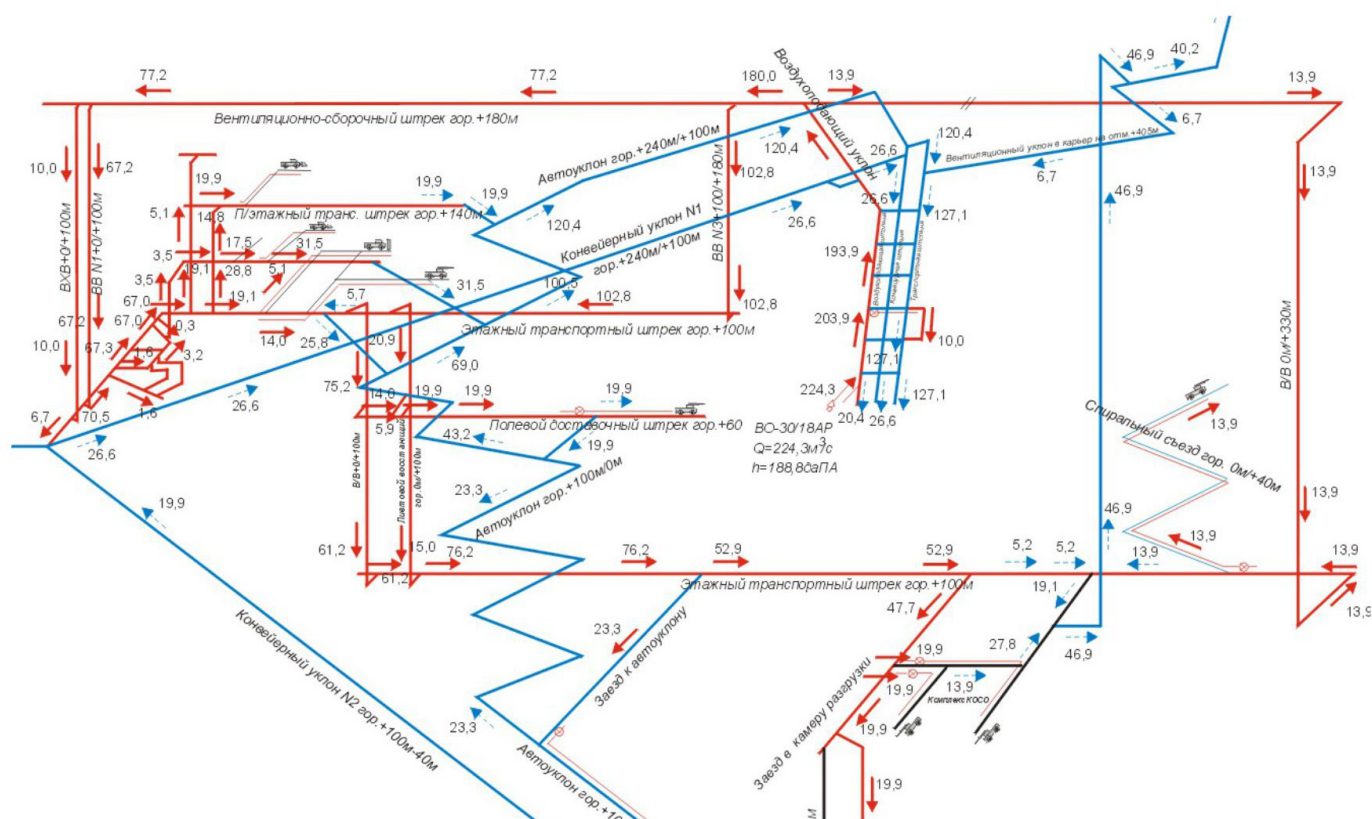




# УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФГБУН  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

**С. А. Козырев, А. В. Осинцева, П. В. Амосов**

**УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ  
В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ  
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Апатиты  
2019

DOI 10.25702/KSC.978-5-91137-400-6

УДК 622.4:519.6

К 59

Утверждено к печати ученым советом Горного института КНЦ РАН

Рецензенты:

*Гендлер С. Г.* — доктор технических наук, профессор

*Терещенко С. В.* — доктор технических наук, профессор

**Козырев, С. А.**

К 59 Управление вентиляционными потоками в горных выработках подземных рудников на основе математического моделирования аэродинамических процессов / С. А. Козырев, А. В. Осинцева, П. В. Амосов. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 114 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-400-6

В монографии представлены результаты исследований авторов по ряду актуальных вопросов рудничной аэрологии. Продемонстрировано авторское решение важной при проектировании горнодобывающих предприятий задачи — оптимизации размещения и параметров перемычек и вентиляторов в сети выработок с целью улучшения проветривания рабочих зон и уменьшения мощности, необходимой для организации проветривания всей вентиляционной системы. Предложен и реализован метод выбора параметров регуляторов и оптимизации их размещения, основанный на анализе взаимосвязи параметров сети и применении генетического алгоритма, который реализован в программном продукте VentCAD собственной разработки.

По результатам натурных испытаний аэродинамики турбулентных воздушных потоков в тупиковых выработках и численного моделирования процесса выноса газообразных продуктов взрыва доказана возможность увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб с соблюдением нормативного времени на проветривание.

Методами численного моделирования продемонстрированы возможности проветривания протяженных тупиковых выработок после взрывных работ за счет турбулентной диффузии, в том числе с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения. Ил. — 37, табл. — 22, библиогр. — 157 назв.

Книга предназначена для научных и научно-технических работников, занимающихся вопросами рудничной аэрологии, и может быть использована в качестве пособия для аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Научное издание

Редактор С. А. Шрам

Технический редактор: В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 26.06.2019. Формат бумаги 70×108 1/16.

Усл. печ. л. 10. Заказ № 22. Тираж 300 экз.

Издательство ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН

184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14

www.naukaprint.ru

ISBN 978-5-91137-400-6

© Козырев С. А., Осинцева А. В., Амосов П. В., 2019

© Горный институт — обособленное подразделение  
ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр  
Российской академии наук» (ГоИ КНЦ РАН), 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                       | 4   |
| 1. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ<br>ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ<br>ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА          | 7   |
| 1.1. Состояние вопроса методов расчета воздухораспределения<br>в вентиляционной сети подземного рудника .....                                        | 7   |
| 1.1.1. Анализ методов расчета воздухораспределения в сети<br>и оптимизации вентиляционной системы.....                                               | 7   |
| 1.1.2. Обзор существующих программных комплексов<br>для проектирования вентиляции рудников .....                                                     | 21  |
| 1.1.3. Выводы по главе 1.1 .....                                                                                                                     | 24  |
| 1.2. Теоретические основы метода оптимизации размещения регуляторов<br>в вентиляционной сети рудника.....                                            | 25  |
| 1.2.1. Анализ взаимосвязи параметров вентиляционной системы.....                                                                                     | 25  |
| 1.2.2. Генетический алгоритм поиска оптимальных параметров<br>регуляторов.....                                                                       | 33  |
| 1.2.3. Совершенствование метода расчета воздухораспределения.....                                                                                    | 43  |
| 1.2.4. Выводы по главе 1.2 .....                                                                                                                     | 52  |
| 1.3. Особенности реализации метода оптимизации регуляторов вентиляции<br>рудника в системе автоматизированного проектирования.....                   | 54  |
| 1.3.1. Трехмерное моделирование вентиляционной сети в системе<br>автоматизированного проектирования вентиляции .....                                 | 54  |
| 1.3.2. Расчет воздухораспределения .....                                                                                                             | 58  |
| 1.3.3. Модуль регуляторов .....                                                                                                                      | 63  |
| 1.3.4. Выводы по главе 1.3 .....                                                                                                                     | 65  |
| 1.4. Оптимизация размещения регуляторов в вентиляционных системах<br>рудников .....                                                                  | 65  |
| 1.4.1. Пример регулирования вентиляционной сети рудника Олений ручей .....                                                                           | 65  |
| 1.4.2. Пример регулирования вентиляционной сети рудника Партомчорр ...                                                                               | 75  |
| 1.4.3. Выводы по главе 1.4 .....                                                                                                                     | 78  |
| 2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ В РУДНИЧНОЙ АЭРОЛОГИИ.....                                                              | 80  |
| 2.1. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой<br>выработки до конца вентиляционных труб.....                                          | 80  |
| 2.1.1. Экспериментальное определение дальноточности струи<br>в горных выработках .....                                                               | 80  |
| 2.1.2. Численное моделирование аэрогазодинамических процессов.....                                                                                   | 83  |
| 2.2. Обоснование возможности проветривания .....                                                                                                     | 89  |
| 2.2.1. Методический подход к оценке времени проветривания .....                                                                                      | 89  |
| 2.2.2. Численное моделирование процесса проветривания одиночной<br>тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха<br>через зону обрушения ..... | 95  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                     | 103 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....                                                                                                                       | 105 |

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективное, качественное и устойчивое проветривание горных выработок является одним из главных факторов, определяющих безопасные условия труда в подземном руднике.

Рудные месторождения часто имеют неправильную форму и непостоянные элементы залегания, в ряде случаев они состоят из обособленных и взаимно удаленных залежей с различной горно-геологической характеристикой. Эти особенности рудных месторождений обуславливают необходимость применения сложных схем вскрытия и отработки глубоких горизонтов, что приводит к образованию весьма протяженной и разветвленной сети подземных выработок.

На устойчивость режима проветривания влияет также наличие на одном и том же руднике нескольких обособленных залежей, расположенных сравнительно далеко одна от другой и обслуживаемых несколькими вентиляционными стволами, оборудованными разными вентиляционными установками. В таких условиях на отдельных участках вентиляционной сети могут образовываться застойные зоны.

К специфическим особенностям разработки рудных месторождений относится то, что в рудниках одновременно находится в действии большое число блоков, эксплуатационные работы в которых могут проводиться с применением разных систем разработки. Интенсивный вынос пыли и газов можно обеспечить только при подаче в рудник и отдельные забои достаточно большого количества воздуха. Для преодоления общего сопротивления рудника при этом необходимо применять высокопроизводительные и высоконапорные вентиляторы огромной мощности.

Вместе с тем увеличение количества воздуха имеет предел. Этому пределу соответствует наибольшая допустимая скорость движения воздуха по горным выработкам, превышение которой влечет за собой сдувание дисперсной пыли и увеличение ее концентрации в рудничном воздухе.

С углублением горных работ управление вентиляцией рудника усложняется. Подаваемый в рудник воздух по выработкам и очистным блокам распределяется неравномерно, чему способствует весьма сложная и сильно разветвленная сеть горных выработок, особенно в случаях одновременной отработки нескольких этажей. 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 и приводит к образованию застойных зон или, напротив, резкому увеличению скорости воздуха и превышению предельных по требованиям техники безопасности значений в отдельных выработках.

Для отработки новых горизонтов требуется пересматривать схемы проветривания горных выработок, учитывая связность вентиляционной сети и взаимосвязи вентиляционных параметров разных выработок. По мере развития технологических процессов разработки месторождений, появления нового оборудования, ужесточения требований надзорных органов необходимо совершенствование методического и программного обеспечения проектирования вентиляционных систем. Современные возможности вычислительной техники

позволяют ставить задачи по проведению сложных процедур многокритериальной оптимизации вентиляционной сети, традиционно решаемые проектировщиками преимущественно на основе эмпирических подходов.

Усложняют процесс регулирования вентиляционной сети такие факторы:

- наличие зоны (зон) обрушения, через которую происходит утечка-подсос 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.

Особенно сложным вопросом является определение устойчивости и эффективности проветривания в сложных многодиагональных соединениях, так как зачастую очистные выработки, требующие максимально устойчивой и надежной подачи воздуха, представляют собой многочисленные диагонали. Процесс распределения воздуха между диагональными соединениями — наиболее сложная задача расчета и управления. Наличие в сети пространственных диагоналей — наклонных и вертикальных выработок между подэтажами и этажами, как, например, на Хибинских апатитовых рудниках, усугубляет сложность регулирования распределения воздуха, так как в различных частях сети появляются обратные запланированным направлениям потоки и выработки с нейтральным режимом.

Проектирование вентиляционной системы в таких условиях требует детального расчета воздухораспределения в сети с учетом всех перечисленных выше факторов, а значит, требуются и средства автоматизации проектирования вентиляционных сетей, позволяющие упростить процесс оптимизации регулирования воздуха в сети.

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

Вопросам регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях рудников посвящено значительное число работ, среди которых можно выделить труды иностранных и российских исследователей, таких как А. Д. Вассерман, С. П. Алехичев, Г. В. Калабин, Ф. А. Абрамов, В. А. Бойко, А. А. Потемкин, Р. Б. Тянь, С. Цой, А. Д. Багриновский, Е. И. Рогов, С. И. Петрович, С. М. Цхай, М. Н. Бодягин, А. Г. Евдокимов, А. А. Мясников, С. И. Луговской, Г. К. Рязанцев, Е. Г. Давыдов, С. А. Сарац [S. A. Sarac], С. Косциц [Koscic], З. Янг [Z. Y. Yang] с коллегами, Ф.-Б. Жоу [F.-B. Zhou] и др.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие программные продукты по проектированию вентиляционных систем подземных рудников: в России — IRS Вентиляция ПЛИА, Аэросеть, Вентиляция 2.0, САПР ВС, Динавент и др., за рубежом — VentSim (Австралия), VnetPC (США), VUMA (ЮАР), РЕВОД (Украина) и др. Однако проблема оптимизации размещения

регуляторов разных видов в протяженной вентиляционной сети рудника в этих программных продуктах решена не полностью и остается важной научно-технической задачей.

Эти обстоятельства указывают на необходимость разработки методов и средств оптимизации размещения местных регуляторов в вентиляционной сети для системы автоматизированного проектирования вентиляционных систем. Следовательно, требуется разработать средства автоматизации создания и редактирования топологической модели, совершенствовать методы расчета распределения воздуха в сети с действующими регуляторами для моделирования вариантов расположения регуляторов в вентиляционной сети, разработать метод оптимизации размещения и параметров регуляторов в вентиляционной системе рудника, совершенствовать методы оценки эффективности проветривания рудника с заданным размещением регуляторов.

Представляемая монография посвящена результатам исследований специалистов Горного института КНЦ РАН в первую очередь по обозначенной выше актуальной проблеме. **Первый раздел** монографии представляет достижения авторов по проблеме оптимизации размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника, которая выполняется на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма.

В главе 1.1 представлен достаточно подробный обзор и анализ современного состояния обсуждаемого вопроса по методам расчета и регулирования распределения воздуха в подземных рудниках. Здесь же приводится обзор программных продуктов в области автоматизации проектирования вентиляции.

В главе 1.2 дано теоретическое обоснование предлагаемого метода оптимизации размещения и параметров регуляторов на основе взаимосвязи параметров вентиляционной системы и генетического алгоритма оптимизации размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника, а также изложен усовершенствованный алгоритм расчета распределения воздуха в сети.

В главе 1.3 приведены результаты практической реализации разработанных методов и алгоритмов в модулях системы автоматизированного проектирования (VentCAD).

В главе 1.4 представлен анализ применения разработанных методов и алгоритмов по регулированию вентиляционных сетей рудников Олений Ручей и Партомчорр.

Помимо решения задач, связанных с расчетом вентиляционных сетей подземных рудников, авторы уделяют особое внимание использованию методов численного моделирования применительно к некоторым вопросам рудничной аэрологии. В частности, во **втором разделе** представлены результаты компьютерного моделирования по проблеме проветривания тупиковых выработок после взрывных работ как при нагнетательном способе проветривания, так и за счет механизма турбулентной диффузии, в т. ч. с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения.

# **1. ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

## **1.1. Состояние вопроса методов расчета воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника**

### **1.1.1. Анализ методов расчета воздухораспределения в сети и оптимизации вентиляционной системы**

Сеть горных выработок шахт и подземных рудников представляет собой сложную топологическую сетевую систему, состоящую из большого количества ветвей (500 и более), суммарная длина которых достигает десятки и сотни километров. При решении многих вопросов, связанных с организацией проветривания действующих шахт, а также при проектировании и реконструкции вентиляции часто возникают проблемы расчета вентиляционных сетей, анализа топологии и управления воздухораспределением в сложных вентиляционных сетях. Для успешного решения этих проблем могут быть применены достаточно хорошо разработанные методы теории графов и численные методы. Действительно, любую вентиляционную сеть можно представить как конечный связный граф. Множество прикладных задач проветривания и управления проветриванием с формальной точки зрения являются экстремальными задачами на графах.

Кроме того, существуют проблемы оптимизации вентиляционной сети, которые не сводятся непосредственно к задачам оптимизации на графе, поскольку при их решении необходимо учитывать взаимозависимость внутренних и внешних параметров вентиляционной системы, а также множественность критериев оптимизации вентиляции.

Любая шахта или рудник с точки зрения проветривания представляет собой единую вентиляционную систему, состоящую из сети горных выработок, служащих для движения воздуха, из источников вредностей и источников тяги (вентиляторов), работающих на данную вентиляционную систему. Каждую горную выработку можно рассматривать как воздухопровод, обладающий некоторым аэродинамическим сопротивлением, величина которого зависит от аэродинамических характеристик и геометрических размеров самой выработки [1, 2].

Моделью вентиляционной системы рудника является взвешенный ориентированный граф, в котором ветви обозначают направление движения воздуха, а узлы — места разделения или слияния отдельных струй. Под весом ветви в зависимости от формулировки проблемы можно понимать как отдельные параметры (аэродинамическое сопротивление, депрессию или расход воздуха), так и взвешенный показатель качества проветривания ветви, определяемый по ряду параметров.

Сложность вентиляционной сети определяется количеством ветвей и топологией самой сети. Обычно вентиляционная сеть угольных шахт содержит 100–300 ветвей. Для рудных шахт сети в 1000 и более ветвей являются обычными.

Прогресс горнодобывающей промышленности вызвал необходимость решения сложных задач принудительного перераспределения воздуха в ветвях сети. С 1960-х гг. велась разработка методов оптимального регулирования расходов воздуха в сложных вентиляционных сетях. Таким образом, в теории вентиляционных сетей образовались два обособленных направления исследований: разработка методов определения расходов воздуха и разработка методов оптимального регулирования расходов воздуха в ветвях сети.

Сейчас разработано большое количество методов, способов и приемов решения различных сетевых задач. Естественно, что для анализа всего многообразия существующих методов уже невозможно обойтись без какой-либо их классификации. Не затрагивая графические и графоаналитические методы, как не входящие в область методов оптимизации, мы можем воспользоваться классификацией существующих методов, данной в работе [3]:

- 1) методы линеаризации;
- 2) методы последовательных приближений;
- 3) методы минимизации специальных функций;
- 4) методы теории графов.

**Методы линеаризации.** Сущность методов линеаризации заключается в линейной аппроксимации нелинейных законов сетей. В этой области работали А. С. Попов, А. Ф. Воропаев, С. Цой и Е. И. Рогов, и др. Методы А. С. Попова и А. Ф. Воропаева заключаются в линеаризации квадратных уравнений сетей по приближенным формулам [4, 5]. Данные методы пригодны лишь для расчета естественного распределения воздуха в сети, однако проводить расчет сложных кольцевых сетей с их помощью практически невозможно. Кроме того, эти методы не позволяют решать задачи оптимального регулирования сети.

В 1961–1963 гг. исследованиями С. Цоя и Е. И. Рогова метод линеаризации уравнений законов сетей был распространен на сеть любой сложности при любом количестве произвольно включенных вентиляторов [6]. Этот метод в настоящее время довольно широко известен. Его сущность заключается в том, что система линейных и нелинейных уравнений аппроксимируется системой линейных уравнений. Далее полученная система уравнений решается известными аналитическими способами и находится следующее приближение расходов воздуха в ветвях.

Для решения задач регулирования сложных вентиляционных сетей авторы данного метода предложили аналогичные системы характеристических уравнений, полученные при условии ожидаемого изменения некоторых параметров сети (динамика параметров ветвей). Однако прежде чем решать задачу регулирования, необходимо заранее определить ветви, где будет произведено регулирование.

Данный метод решает довольно широкий круг вентиляционных задач. Основными его преимуществами являются простота составления системы линеаризованных уравнений по узлам и независимых циклам и быстрая сходимость процесса вычислений. Однако рассматриваемый метод обладает и весьма существенными недостатками, а именно:

1. Задачи регулирования при решении этим методом имеют частный характер: число ветвей с заданными расходами должно быть равно числу регуляторов.

2. Решать задачи оптимального регулирования относительно затрат мощности или общих расходов на проветривание невозможно.

3. Для обеспечения быстрой сходимости процесса вычислений необходимо задавать первое приближение расходов воздуха довольно близко от их истинных значений, что чрезвычайно трудно при расчете сложных сетей.

4. Для решения задач регулирования необходимо интуитивно задавать места установки регулировочных устройств, что в сложных сетях может привести к несовместимости условий поставленной задачи.

Широкие и детальные исследования в области общего поиска метода решения сетевых задач позволили выявить возможности и принципиальные недостатки методов линеаризации. С 1970-х гг. не наблюдается их существенного развития.

**Методы последовательных приближений.** Из наиболее полно разработанных и принципиально отличных друг от друга к этому классу можно отнести методы, которые были предложены В. И. Беловым, М. М. Андрияшевым, В. Г. Лобачевым, П. Ренуар и др. [7–10].

Методы В. И. Белова, М. М. Андрияшева и В. Г. Лобачева неоднократно анализировались различными исследователями [3, 11–13], их общий недостаток заключается в том, что все они пригодны лишь для расчета сетей при естественном распределении воздуха в ветвях сети.

Метод М. М. Андрияшева, предложенный им в 1932 г. [7], в настоящее время широко известен и в той или иной модификации общепризнан как в России, так и за границей. Идея данного метода очень проста: после задания первого приближения расходов подсчитывается невязка депрессии в каждом независимом контуре и находится общая поправка для всех ветвей независимого контура, затем процесс вычислений повторяется. Однако сам автор отмечал, что процесс вычислений имеет медленную сходимость. Данное обстоятельство связано с тем, что М. М. Андрияшев при выводе формулы для поправки сделал математическое допущение, фактически пренебрегая квадратичными членами уравнения.

Этот метод является сейчас фактически основным при аналитических расчетах вентиляционных сетей и продолжает развиваться и совершенствоваться как российскими, так и зарубежными исследователями, чему причиной является простота алгоритма вычислений, что позволяет рассчитывать сети с количеством ветвей больше 1000.

Однако в первоначальном виде указанный метод имел существенные недостатки и фактически мог применяться только для решения естественного распределения воздуха в ветвях сети. Поэтому исследователи стремились распространить метод М. М. Андрияшева на более широкий класс задач: с учетом характеристик источников тяги и для регулирования сети.

Рассмотрим основные исследования в этой области.

Р. Б. Тянь рассматривал частный случай, когда сеть содержит вентиляторы, характеристика которых выражена квадратным полиномом без линейной части [14]. В. И. Россочинский предлагал более простую формулу для расчета содержащих источники тяги вентиляционных сетей — по методу М. М. Андрияшева, с учетом депрессии вентиляторов [15]. Полученная им эмпирическая формула является весьма грубой по сравнению с формулами, выведенными предыдущими исследователями [16], что, безусловно, еще более замедляет скорость сходимости процесса вычислений.

Ф. А. Абрамов, В. А. Бойко и Р. Б. Тянь опубликовали работу, в которой доказали, что процесс последовательных приближений всегда сходится [17]. Данные исследователи первыми решили вопрос рационального распределения информации в оперативной памяти компьютера для решения задач методом последовательных приближений, что позволило им непосредственно решать сети, число ветвей которых достигало 200. Они же предложили методику решения сетей, количество ветвей которых составляет от 200 до 1000, с разбивкой на участки. В настоящее время мощность современных компьютеров позволяет быстро решать сети размерностью больше 1000 ветвей, но при условии сходимости процесса, которая может и не достигаться, если поправки расходов будут соизмеримы с точностью расчетов.

Методы последовательных приближений для решения вентиляционных задач продолжают интенсивно разрабатываться по причинам простоты идеи последовательных приближений и легкости численной реализации на ЭВМ [18]. Однако до настоящего времени даже среди обширного класса методов расчета сетей последовательными приближениями нет ни одного общего метода, который можно было бы применить к решению задачи оптимального регулирования сети с неизвестным размещением регуляторов.

**Методы минимизации специальных функций.** С 1960-х гг. в теории вентиляционных сетей наметилось новое направление разработки методов решения вентиляционных задач. Многие задачи, не имеющие аналитического решения либо имеющие большую размерность, были успешно решены методами математического программирования. В этой области для решения вентиляционных задач было предложено несколько методов минимизации специальных функций. Основой всех этих методов является замена необходимости решения системы уравнений минимизацией какой-либо искусственной функции.

Рассмотрим наиболее полно разработанные методы этого направления. Метод Н. У. Койды (1965) заключается в том, что минимум специальной функции достигается при таких значениях напоров жидкости в узлах сети, которым соответствуют расходы жидкости в ветвях сети, удовлетворяющие первому и второму законам сетей [19]. Для отыскания минимума автором был предложен один из методов целенаправленного перебора. Описанный метод имеет ряд преимуществ, а именно: отпадает необходимость решения систем уравнений; задачи естественного и искусственного распределения воздуха в сети решаются единой методикой; алгоритм вычислений достаточно прост. Однако наряду с достоинствами этот метод имеет существенные недостатки: не охватывает задач регулирования сети и тем более оптимального регулирования; при расчетах сложных вентиляционных сетей объем вычислений по методу целенаправленного перебора резко возрастает, а сложность минимизируемого функционала не позволяет применить более эффективные методы минимизации.

Метод В. С. Кузьмина подразумевает использование для минимизации специальной функции одного из четырех методов минимизации: поочередного уточнения параметров, групповой релаксации, наискорейшего спуска или модифицированного метода наискорейшего спуска [20]. После анализа лучшим автор посчитал модифицированный метод наискорейшего спуска. Преимущества метода В. С. Кузьмина в сравнении с методом Н. У. Койды заключаются в том, что минимизируемая специальная функция имеет более простой вид, что

позволило автору метода применить довольно широкий класс методов математического программирования. Кроме того, в результате решения поставленной задачи непосредственно получаются искомые расходы воздуха в ветвях сети, а не напоры в ее узлах. Недостатки этого метода: громоздкий алгоритм вычислений; обилие промежуточных вычислений специальных функций и их производных; невозможность решения задач оптимального регулирования расходов воздуха в сети.

**Методы теории графов.** С. Цой первым детально исследовал топологию вентиляционных сетей как ориентированный граф и, в частности, рекомендовал составлять уравнения законов сетей, используя матрицы инцидентности дуг и независимых контуров [6]. Было доказано, что система, полученная на основе минимального дерева графа, сходится быстрее всего. Позже Р. Б. Тянь, используя эти рекомендации, решил систему уравнений законов сетей методом последовательных приближений и градиентным методом [17]. Однако итоговые минимизируемые выражения у В. С. Кузьмина и Р. Б. Тяня совпадают. Если Р. Б. Тянь отыскивал минимум функции градиентным методом, то В. С. Кузьмин минимизировал аналогичное выражение методом наискорейшего спуска. Как известно, вычислительный алгоритм градиентных методов громоздок и объем его резко возрастает с увеличением размерности задачи. Это, по-видимому, явилось причиной того, что предел размерности задачи по методу Р. Б. Тяня ограничен матрицей размерностью 120, в то время как по методу В. С. Кузьмина он достигает 600 ветвей.

А. Г. Евдокимов также рассматривал вентиляционную сеть как ориентированный граф. В рассмотрение вводилась топологическая матрица знаков контуров для ветвей дерева, и на ее основе составлялись уравнения первого и второго законов сетей с учетом характеристик источников тяги [21].

Далее полученную матрицу алгебраических уравнений А. Г. Евдокимов решал четырьмя методами: Ньютона, модифицированным (Ньютона), Лобачева — Кросса и Андрияшева. Сравнивая процессы вычислений, автор отдавал предпочтение методу Ньютона. Но так как этот метод требует весьма точного первого приближения, автор рекомендовал определять это приближение решением той же системы алгебраических уравнений с допущением, что все они линейны относительно расходов воздуха.

На основе изложенного метода А. Г. Евдокимов предложил методику решения известных семи классов вентиляционных задач, как они были сформулированы А. Д. Багриновским [22–25], что является преимуществом этого метода. Однако общая задача оптимального регулирования, когда число ветвей с заданными расходами меньше числа связей дерева сети, только сформулирована, но фактически не разрешена предлагаемым методом. Частные случаи задач оптимального регулирования расходов воздуха в сети сводятся к канонической линейной форме и решаются не прежним алгоритмом, а симплекс-методом, что не позволяет назвать описанный метод общим. Кроме того, в работе не был дан алгоритм нахождения независимых контуров сети, такие алгоритмы были представлены другими исследователями позже.

Проведенный анализ общих методов расчета вентиляционных сетей позволяет сделать вывод о том, что подавляющее большинство методов расчета вентиляционных сетей не затрагивает задач регулирования и только некоторые из них распространяются на частные случаи этих методов.

Так, градиентным методом Р. Б. Тяна можно решать задачи регулирования при условии, что общее число искомым величин (расходов воздуха и сопротивлений) должно быть равно общему числу ветвей в сети. Метод линеаризации С. Цоя и Е. И. Рогова охватывает также частные задачи регулирования, когда сумма заданных расходов воздуха равна сумме искомым регуляторов. Кроме того, все эти методы требуют предварительного назначения мест установки регулирующих устройств, что в сложных сетях может привести к несовместности условий для решения задачи.

Наряду с рассмотренными общими методами решения вентиляционных задач по естественному и искусственному распределению воздуха и частными случаями задач регулирования сети существуют специальные методы, разработанные для решения конкретных задач регулирования расходов воздуха с некоторыми ограничениями. Рассмотрим наиболее характерные из них.

**Метод Ф. А. Абрамова.** Решается задача регулирования, когда число ветвей сети с заданными расходами воздуха равно цикломатическому числу графа, т. е. количеству независимых контуров. Автор метода отметил, что если какой-либо контур не содержит ветвь с заданным расходом воздуха, то задача неразрешима [26]. Следовательно, этим методом решается задача регулирования, когда каждый независимый контур сети содержит только одну ветвь с заданным расходом воздуха. В результате решения задачи определяются расходы воздуха в ветвях какого-либо дерева сети и параметры регулирующих устройств.

В предлагаемой методике выбора независимых маршрутов сомнительно применение правила размещения «запретов» на ветви сети. Очевидно, что в сложных сетях выбор маршрутов по предложенной методике представляет определенную трудность, поскольку неизвестно, когда и где следует отклоняться от общего правила.

Необходимо также отметить, что постановка задачи регулирования, решаемой автором, носит весьма частный характер и не требует для своего решения сложных топологических работ на схеме сети. Действительно, если известны расходы воздуха во всех независимых связях дерева, то расходы воздуха в остальных ветвях (ветвях дерева) определяются просто и однозначно по уравнениям первого закона сетей. А поскольку расходы воздуха во всех ветвях сети и их сопротивления также известны, то, увязав независимые контуры сети по второму закону сетей, мы получим искомое решение задачи и одновременно разместим регулировочные устройства в ветвях сети.

**Метод С. Цоя, С. И. Петровича и С. М. Цхая.** Авторы метода рассматривали задачу оптимального регулирования сети в следующей постановке. В сети, имеющей  $n$  ветвей и  $k$  связей полного дерева, необходимо обеспечить требуемые известные расходы воздуха в  $n_q$  ветвях. Нужно определить новые расходы воздуха в остальных ветвях, параметры и места установки регуляторов при минимуме расхода мощности на проветривание сети. Рассматривалось два случая:

1. Когда  $n_q = k$  или  $n_q = n$ , то условия задачи при ограничениях, накладываемых вторым законом сетей на независимые контуры, и условие неотрицательности сопротивлений описываются линейной относительно сопротивления функции:

$$L = \sum_{i=1}^n R_i q_i^3 \rightarrow \min_{R_i},$$

где  $R_i$  — аэродинамическое сопротивление  $i$ -й ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ;  $q_i$  — расход воздуха в  $i$ -й ветви,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Решение в этом случае осуществляется стандартными методами линейного программирования.

2. Когда  $n_q < k$ , то задача сводится к нелинейному программированию и описывается нелинейным функционалом, на который наложены более сложные ограничения, чем в предыдущем случае.

Несомненным преимуществом этого метода является то, что авторам удалось решить систему ограничений в общем виде линеаризацией нелинейных зависимостей с применением модификации симплексного метода [6, 27].

Однако описанный метод имеет весьма существенные недостатки. Математические модели, полученные авторами, не учитывают возможного опрокидывания струй воздуха в некоторых ветвях сети. В случае нелинейной задачи процесс вычислений нередко имеет медленную сходимость, так как линеаризации подвергнут невыпуклый функционал. Кроме того, метод требует предварительного выявления возможных мест установки регулирующих устройств, что может привести к несовместности условий задачи, либо в результате решения потребуется установка регуляторов в каждом контуре сети, что, безусловно, не будет самым экономичным решением.

Несколько позже такой же подход к решению задач оптимального регулирования сделали Р. Б. Тян и А. Г. Евдокимов [14, 21]. Однако, разрешив частный случай поставленной задачи при линейном функционале аналогичным способом, указанные авторы не смогли решить ее в общем нелинейном случае.

**Метод С. Цоя.** Впервые в теории вентиляционных сетей в постановке задачи оптимального регулирования, кроме минимума расходуемой на проветривание мощности, были учтены затраты на сооружение и эксплуатацию вентиляционных устройств и регуляторов [3].

Математическая модель, разработанная автором, использует коэффициент стоимости единицы мощности за время действия данной выработки, расходы на установку дополнительных перемычек и расходы, связанные с установкой и эксплуатацией вспомогательного вентилятора.

Однако в общей постановке систему уравнений разрешить не удалось. На основании данной системы автором было предложено решение ряда частных случаев регулирования. В качестве основного метода решения системы предлагался метод линеаризации с последующим применением симплекс-метода.

**Методы маршрутных матриц и независимых контуров (С. Цой, Г. К. Рязанцев, Е. Г. Давыдов).** Данные методы описывают широко используемые эмпирические подходы при решении практической задачи обеспечения требуемых расходов воздуха за счет изменения сопротивления перемычек. Алгоритм выбора и расчета требуемых сопротивлений регуляторов в обоих методах имеет единую основу [28].

В целом, в обоих методах возможна ситуация, когда пределы изменения сопротивлений регуляторов не позволяют свести к нулю контурные (или соответственно маршрутные) невязки по депрессии. Это вполне вероятно, если учитывать технологические возможности как отрицательного регулирования

(увеличение сопротивлений вентиляционных сооружений), так и положительного (увеличение сечений выработок). В таких случаях дальнейшее регулирование вентиляционной сети с целью обеспечения объектов требуемыми расходами воздуха без изменения топологии возможно только путем изменения текущих режимов вентиляторов главного проветривания в пределах их рабочих зон и области промышленного использования.

Наиболее общий способ — изменение характеристик всех вентиляторов, при этом меняются расходы воздуха и депрессии по всем ветвям. Такое изменение может осуществляться вручную по графикам характеристик, а также в автоматическом режиме на основе анализа значений средней депрессии маршрутов на каждый вентилятор и депрессий самих вентиляторов. Естественно, должен производиться контроль попадания режимов вентиляторов главного проветривания в зону их устойчивой работы [29].

Такое масштабное воздействие на сеть не всегда может привести к нужному эффекту, то есть снятию невязки по депрессии. Могут возникнуть и ситуации опрокидывания направлений потоков воздуха по выработкам, что приведет к резкому увеличению невязок депрессии по отдельным контурам или маршрутам. Более эффективным для достижения целей регулирования является вариант изменения характеристики одного конкретного вентилятора главного проветривания [30, 31].

Метод маршрутных матриц и метод независимых контуров применимы к решению задачи регулирования, когда известны места расположения регуляторов в сети и пределы изменения их сопротивлений. Такая постановка задачи имеет место, когда в вентиляционной сети существует сложившаяся топология и возможны только определенные технологические решения.

**Метод пропорциональных поясных сопротивлений Е. Г. Давыдова.** Метод также базировался на итерационном процессе пересчета сопротивлений регуляторов, однако вводилось понятие «поясной депрессии» [32].

Суть каждой итерации — определение сопротивлений регуляторов из условия уравнивания поясных депрессий при заданных расходах воздуха и контрольный расчет естественного распределения воздуха по новой системе сопротивлений регуляторов с целью проверки выполнения заданных расходов воздуха с допустимой погрешностью по всем объектам проветривания.

Необходимо отметить, что обеспечение множества заданных объектов требуемым количеством воздуха в данном методе достигалось только изменениями сопротивлений множества регуляторов. Кроме того, программная реализация не имела интерфейсного инструмента, позволяющего пользователю анализировать и управлять процессом регулирования. В силу ряда причин этот комплекс задач регулирования не доведен до кондиции современного программного продукта.

Все результаты проведенных в то время исследований показывали, что налицо ряд практических и интерпретационных сложностей, которые мешают применить разработанные алгоритмы и программы к решению достаточно широкого класса оптимизационных проблем.

Основная сложность — это недостаточная робастность разработанных алгоритмов. Во всех методах сначала задавалась конфигурация вентиляционной сети, то есть один вспомогательный вентилятор устанавливался в определенное место в сети, его депрессия задавалась и вентилятор главного проветривания

(ВГП) должен был работать в определенном режиме. После решения задачи воздухораспределения и определения потоков воздуха и депрессии задавались новые значения депрессии вспомогательного вентилятора и ВГП. Для них также вычислялось распределение воздуха, и итерационный процесс продолжался. Локальное оптимальное решение, то есть лучшая комбинация рабочих режимов ВГП и вспомогательного вентилятора, затрачивающая минимальную мощность, могло быть определено по результатам проведенного таким образом расчета. Вся процедура повторялась путем установки вспомогательного вентилятора в новое место с заданным режимом работы и изменением режима работы ВГП в заданном диапазоне. Анализ последних и предыдущих результатов позволял инженеру выбрать «глобальное» оптимальное решение, представлявшее собой лучшую комбинацию режима работы ВГП, депрессии вспомогательного вентилятора и его расположения [33, 34].

Применение описанного подхода напрямую обуславливает трудности с анализом вариантов с несколькими вспомогательными вентиляторами. Процедуры, необходимые для определения оптимального решения только для одного вентилятора, очевидно, являются затратными по времени и сложными. Сложность резко возрастает при анализе вариантов более чем с одним вспомогательным вентилятором и рядом потенциально пригодных мест для установки [35, 36].

**Метод, основанный на применении генетических алгоритмов (Ф. Янг и др.).** В последние годы в Великобритании, США и Китае ведется разработка программного обеспечения для решения задачи оптимального расположения регуляторов в сети на основе применения в данной предметной области эвристических методов поиска — генетических алгоритмов [37–39].

Почти два десятилетия исследований данных алгоритмов на тестовых многоэкстремальных функциях ушли на доказательство того, что они могут использоваться как процедуры глобальной оптимизации, оставив в некоторой тени их выдающиеся адаптивные способности. Возможность того, что вычислительная система, наделенная простыми механизмами изменчивости и отбора, могла бы функционировать по аналогии с законами эволюции в природных системах, была очень привлекательна. Эта надежда стала причиной появления ряда вычислительных систем, построенных на принципах естественного отбора.

История «эволюционных» вычислений началась с разработки ряда различных независимых моделей. Основными из них были генетические алгоритмы и классификационные системы Голланда (Holland), опубликованные в начале 1960-х гг. и получившие всеобщее признание после выхода в 1975 г. в свет книги, ставшей классикой в этой области, — «Адаптация в естественных и искусственных системах» (Adaptation in Natural and Artificial Systems) [40]. В 1970-х гг. в рамках теории случайного поиска Л. А. Растргиным был предложен ряд алгоритмов, использующих идеи бионического поведения особей, ставшие в дальнейшем классическими и описанные в усовершенствованном виде, например, Л. А. Гладковым в [41]. Развитие этих идей нашло отражение в цикле работ И. Л. Букатовой по эволюционному моделированию. Достаточно широкий анализ работ этого автора представлен у Л. А. Гладкова и В. В. Курейчика в монографии [42]. Развивая идеи М. Л. Цетлина о целесообразном и оптимальном поведении стохастических автоматов, Ю. И. Неймарк предложил

осуществлять поиск глобального экстремума на основе коллектива независимых автоматов, моделирующих процессы развития и элиминации особей. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах В. В. Емельянова [43]. Большой вклад в развитие эволюционного программирования внесли Фогел (Fogel) и Уолш (Walsh). Несмотря на разницу в подходах, каждая из этих «школ» взяла за основу ряд принципов, существующих в природе, и упростила их до такой степени, чтобы их можно было реализовать на компьютере. Развернутое описание различных зарубежных методов эволюционного моделирования можно найти в книге [44].

В настоящее время под термином «генетические алгоритмы» скрывается не одна модель, а достаточно широкий класс алгоритмов, подчас мало похожих друг на друга [45, 46]. Исследователи экспериментировали с различными типами представлений, операторами «кроссовера» и «мутации», специальными операторами и различными подходами к «воспроизводству» и «отбору» [47–49].

Хотя модель «эволюционного» развития, применяемая в генетических алгоритмах, сильно упрощена по сравнению со своим природным аналогом, тем не менее они являются достаточно мощными инструментами и могут с успехом применяться для широкого класса прикладных задач, включая те, которые трудно, а иногда и вовсе невозможно решить другими методами. Однако генетические алгоритмы, как и другие методы «эволюционных» вычислений, не гарантируют обнаружения глобального решения за время, сравнимое с работой стандартных полиномиальных алгоритмов оптимизации, например, градиентных методов. Не гарантируют они и того, что глобальное решение будет найдено, но зато хорошо подходят для поиска «достаточно хорошего» решения задачи «достаточно быстро».

Генетические алгоритмы в различных формах использовались при решении многих научных и технических проблем [50], например в машинном обучении — при проектировании нейронных сетей или управлении роботами. Они также применялись при моделировании развития в различных предметных областях, включая биологические (экология, иммунология и популяционная генетика), социальные (экономика и политические системы) и когнитивные системы [51, 52].

Тем не менее возможно наиболее популярное приложение данных алгоритмов — оптимизация многопараметрических функций. Многие реальные задачи могут быть сформулированы как поиск оптимального значения, где значение — сложная функция, зависящая от некоторых входных параметров. В некоторых случаях представляет интерес найти те значения параметров, при которых достигается наилучшее точное значение функции. В других случаях точный оптимум не требуется, так как решением может считаться любое значение, которое лучше некоторой заданной величины. В этом случае генетические алгоритмы — часто наиболее приемлемый метод для поиска «хороших» значений. Сила генетического алгоритма заключена в его способности манипулировать одновременно многими параметрами, эта особенность использовалось в сотнях прикладных программ, включая проектирование самолетов, настройку параметров алгоритмов и поиск устойчивых состояний систем нелинейных дифференциальных уравнений [53].

Для применения генетических алгоритмов первоначально создается «популяция» объектов, причем каждый объект представляет собой возможное решение проблемы. Затем пары отдельных решений комбинируются, производя

«потомка», относящегося к следующему «поколению». Процесс «мутации» также используется для того, чтобы случайным образом модифицировать «генетическую» структуру некоторых «особей» из нового «поколения». После запуска система создает десятки и сотни «поколений». Поскольку вероятность «воспроизводства» отдельных признаков пропорциональна той степени оптимальности, которую они представляют в решении, качество решений в следующих поколениях улучшается автоматически.

Работа генетического алгоритма начинается с конструирования двоичной «хромосомы», представляющей возможные решения этой задачи. Для этого традиционно используются двоичные строки фиксированной длины. Традиция разработки генетических алгоритмов предписывает выбирать каждое последующее «поколение» (то есть совокупность определенного количества «хромосом») путем стохастической, но целенаправленной селекции. Для этого нужно знать, как отличить хорошие «хромосомы» от плохих. Реализация генетического алгоритма предполагает задание функции «приспособленности», или «фитнес-функции». Эта функция получает на вход двоичную «хромосому» и возвращает число, показывающее, насколько хороша эта «хромосома». Оператор «скрещивания» смешивает «генетический материал» двух «родителей», причем можно ожидать, что «приспособленность родителей» выше средней в предыдущем «поколении», так как они только что прошли очередной раунд «борьбы за выживание». Это аналогично соперничеству настоящих живых существ, где лишь сильнейшим удастся передать свои (предположительно хорошие) гены следующему поколению. Важно, что оператор скрещивания может порождать новые «хромосомы», ранее не встречавшиеся в «популяции».

Последний этап — «мутация». Даже для больших «популяций» может оказаться, что не все биты «генетического материала» в ней представлены, например, если первый бит у всех «хромосом» равен 0, то оператор «скрещивания» никогда не породит решение с 1 в первом бите. «Мутация» предназначена для того, чтобы избежать таких ситуаций и увеличить «вариабельность популяции». Частота «мутации» обычно очень низкая.

«Мутация» и «оператор скрещивания» могут порождать новые «хромосомы», которые никогда не встречались в предыдущих «поколениях». Для оценки качества этих решений вычисляется «фитнес-функция». На этом построение нового «поколения» решений заканчивается. При переходе от первого «поколения» ко второму может появиться решение более высокого качества. Однако и оно, скорее всего, еще не будет приемлемым. Как и в естественной эволюции, одна смена «поколений» не приводит к заметному прогрессу вида. Поэтому генетический алгоритм создает следующее «поколение», последовательно применяя «выживание сильнейшего», скрещивание и мутацию. Затем таким же образом обрабатывается это новое поколение и так далее. Процесс повторяется тысячи или даже миллионы раз. При этом могут постепенно «выводиться» очень хорошие решения исходной проблемы. Однако особенность использования «генетических» алгоритмов заключается в том, что полученное решение вовсе необязательно будет оптимальным [54]. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено решение задачи или не будет получено достаточное к нему приближение. Естественно, задается ограничение на максимальное число «поколений» и оставляется возможность вручную остановить алгоритм.

Эффективность генетического алгоритма сильно зависит от таких деталей, как метод кодировки решений, выбор операторов, настройки параметров, частный критерий успеха. Применение метода к прикладной области может быть неэффективным, если пространство поиска небольшое и возможно найти решение простым перебором [55, 56].

Достаточно много исследований было посвящено применению генетических алгоритмов для оптимизации водяных сетей, в частности, подбора оптимальных диаметров трубопроводов [49, 57, 58]. Для водяных сетей также должны выполняться законы Кирхгофа, для них задаются ограничения на минимальные скорости потока и напоры в узлах сети. Целевая функция в данной постановке представляет собой суммарную стоимость трубопроводов заданной длины и выбранных диаметров. Диаметры выбираются из дискретного множества коммерчески доступных диаметров труб. Даже для небольших сетей количество вариантов может быть огромным, поэтому поиск решения такой задачи производится в разных исследовательских организациях. Опубликованы достаточно успешные результаты применения генетических алгоритмов для оптимизации сети, не гарантирующие получения лучшего результата, но удовлетворяющего заявленным требованиям и лучше некоторых других по значению целевой функции. Особо подчеркивается, что решение даже для огромных сетей индустриально развитых мегаполисов, достижимо за реальное время.

В 1998–2005 гг. в Великобритании была разработана первая программа оптимизации вентиляционных сетей с помощью генетических алгоритмов [48, 59]. Целью оптимизации является минимизация мощности, затрачиваемой на проветривание с помощью вентиляторов, путем определения наиболее эффективной комбинации рабочих режимов и их расположения в сети. Программа может быть использована для определения оптимального количества, расположения и режима работы как вентиляторов главного проветривания, так и вспомогательных регулирующих устройств. Исследование расположения пассивных регулирующих устройств авторами не производилось.

Переменные, кодирование которых в строку «хромосомы» осуществляется при работе генетического алгоритма, — это депрессии всех вспомогательных вентиляторов и их потенциальные места установки в сети. Пространство поиска для депрессий вентиляторов представлено конкретным дискретным набором значений депрессии, который задается пользователем. Количество вентиляторов, оценка установки которых будет осуществляться, определяется также пользователем перед запуском алгоритма.

Далее представлены основные процедуры, которые необходимо выполнить при использовании данной программы для выбора оптимального режима работы, местоположения и количества вспомогательных вентиляторов:

1. Определение потенциальных мест установки вентиляторов (ветвей, в которых можно установить вентиляторы). Применение генетического алгоритма позволит определить оптимальные ветви для расположения вентиляторов из числа заданных ветвей. Общее количество потенциальных мест, определенное инженером, должно быть степенью числа 2.

2. Определение ряда возможных значений депрессии вентилятора. Общее количество заданных депрессий также должно быть степенью двойки. Генетический алгоритм проведет анализ и определит оптимальное значение

депрессии для данной сети. В качестве примера тестовых значений депрессии можно привести ряд: 150, 180, 210, 240, ..., 3930, 3960 Па. В этом случае ряд состоит из  $2^7 = 128$  значений депрессии вентилятора с шагом 30 Па. Теоретически ряд мог бы начинаться с нуля, однако из практических соображений напор вспомогательного вентилятора 200 Па определен как минимальное значение, поскольку это позволяет избежать учета точек напор-расход, расположенных на характеристической кривой слишком низко.

3. Анализ чувствительности для определения оптимального количества вспомогательных вентиляторов. Количество вентиляторов, которые нужно установить в системе, может зависеть от нескольких факторов, таких как план горных работ, количество добычных участков и горизонтов, ограничения на количество воздуха, которое нужно поставлять в каждый добычный участок. Вентиляционная система действующего рудника является по своей природе динамической, поэтому количество вентиляторов и их режимы работы должны учитывать возможные изменения в системе на протяжении заданного срока планирования. Чтобы определить оптимальное число вентиляторов в вентиляционной системе, необходимо провести ряд вычислительных экспериментов:

3.1. Нужно последовательно провести анализ возможных вариантов расположения 1, 2, ...,  $n$  вентиляторов с помощью «генетического» алгоритма.

3.2. Интерпретировать результаты каждого анализа, чтобы убедиться, что цели проектирования и наложенные требования непротиворечивы. Отбросить все решения, которые задают непрактичный режим работы вентилятора или вызывают неконтролируемую рециркуляцию воздуха в сети.

3.3. Определить оптимальное число вентиляторов и выбрать каждый вентилятор из набора допустимых типов вентиляторов и характеристик.

3.4. Вновь провести запуск программы, реализующей генетический алгоритм при заданных характеристиках вентиляторов, установленных в нужных местах, для того, чтобы получить распределение воздуха в сети и определить оптимальный режим работы каждого вентилятора.

4. Анализ чувствительности решения следует выполнить для каждой стадии планирования горных работ.

5. Окончательный выбор числа вентиляторов, их расположения в сети и режимов работы нужно делать после оценки применимости решения для каждой стадии ведения горных работ. При выполнении этой процедуры необходимо учесть требования безопасности, ограничения размера вентилятора для заданных геологических условий и требования, предъявляемые к минимальному количеству воздуха, поставляемому к добычным участкам на протяжении всех фаз планирования.

Появление программных пакетов, реализующих генетические алгоритмы для решения задачи оптимизации размещения регуляторов в сложных вентиляционных сетях, обусловлено тем, что в настоящее время рост вычислительной мощности ЭВМ позволяет использовать современные математические методы для решения данной задачи за реальное время. У каждого из разрабатываемых методов есть свои преимущества и недостатки. Применение генетических алгоритмов способно обеспечить некоторые (относительно

хорошие) варианты расположения вентиляторов в сети и определить оптимальные режимы работы вентиляторов главного проветривания, но рассматривать его как оптимизацию системы все же нельзя.

Как известно, вентиляционные сети существуют весьма длительное время, топологически развиваясь во времени и пространстве при непрерывном или дискретном изменении параметров некоторых ветвей. Проведенные рядом российских и зарубежных ученых исследования показали, что решение задач управления подобными системами с отысканием оптимума только для данных моментов времени без учета будущего развития системы не соответствует оптимуму всей системы за весь период ее существования.

Это положение говорит о том, что решение задач оптимального регулирования расходов воздуха в сети необходимо ориентировать на получение оптимальной политики в управлении вентиляционной сетью за весь срок ее существования, т. е. методы решения должны учитывать динамику развития сети во времени и пространстве. Следует отметить, что такая постановка задачи оптимального управления сетью, несмотря на ее острую актуальность, встречалась только у С. Цоя [60].

В настоящее время развитие методов расчета распределения воздуха в вентиляционной системе и методов оптимизации параметров регуляторов продолжается, например, Ю. В. Кругловым и Л. Ю. Левиным с коллегами [61–69], Д. Ю. Палеевым с коллегами [70–72] и другими исследователями [73, 74]. 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 С. Г. Гендлера [75–78].

Очевидно, что в наиболее общей постановке задача регулирования воздухораспределения в рудничной вентиляционной сети является сложной и решение ее в аналитическом виде не представляется возможным. До настоящего времени не определены теоретически количественные соотношения между числом объектов и регуляторов в сети, позволяющие сформулировать условия разрешения проблемы. Исследования оптимальности расположения объектов проветривания и регуляторов в сети хотя и выполнены теоретически, но не доведены до практической реализации.

Основные недостатки разработанных и реализованных на ЭВМ методов заключаются в следующем:

- необходимость предварительного указания мест установки и параметров регуляторов (решение в этом случае сводится лишь к уточнению величин сопротивления);
- задача решается только в том случае, когда количество объектов проветривания равно количеству независимых контуров и в каждом из них при этом имеется только один объект;
- невыполнение условия по допустимому отклонению потока от заданного по отдельным объектам проветривания;
- отсутствие реакции на опрокидывание вентиляционной струи и, как следствие, невозможность решения задачи при комбинированном способе проветривания;

- невозможность совместного осуществления положительного и отрицательного регулирования;
- отсутствие способа учета утечек воздуха в процессе регулирования.

### **1.1.2. Обзор существующих программных комплексов для проектирования вентиляции рудников**

На рынке систем моделирования и расчета рудничной вентиляции предлагается ряд зарубежных программных пакетов и несколько отечественных [79–81].

Австралийский пакет VentSim позволяет выполнять трехмерное моделирование сети подземных выработок с расчетом всех параметров воздушного потока и загрязнений [82, 83]. Программа интегрирована с графическими возможностями операционной системы Windows и построена с учетом достижений CAD-систем. Большинство операций легко выполняется с помощью компьютерной мыши на экране. Быстрые перерасчеты многих вариантов с различными характеристиками вентиляторов и других устройств обеспечивают высокую достоверность получаемой информации. Можно также проводить анализ вентиляции типа «что, если...» для планируемых к проходке выработок. Достоинством пакета является большая база вентиляторов (до 1000 различных действующих типов). Возможны импорт и экспорт файлов из AutoCAD и других горных компьютерных систем. На сайте компании можно получить полностью рабочую демоверсию программы для опробования, обучения и демонстрации. Единственным отличием ее от истинно рабочей программы является невозможность записи смоделированных вентиляционных сетей. Сильными сторонами программного пакета являются качество визуализации данных и имитация загрязнений, удобный интерфейс пользователя. Анализ вентиляции планируемых выработок является ограниченным и не учитывает особенностей взаимного влияния местных вентиляторов. Результаты финансового анализа вариантов вентиляционных сетей являются специфическими для региона производителей пакета и не могут быть применены в российских условиях.

Американский пакет VnetPC, используемый на многих рудниках мира, наиболее близок к российским условиям и правилам безопасности [84–86]. Возможности графического представления вентиляционных сетей в пакете несколько хуже, чем в VentSim. На входе используется информация о геометрии сети горных выработок шахты, параметрах воздушных потоков, характеристике сопротивлений, включая данные о размещении и характеристику вентиляторов. Программа затем рассчитывает необходимые параметры, выводит в текстовом и графическом виде информацию о воздушных потоках, местах падения напора, сопротивлениях потоку, потерях мощности потоков, себестоимости каждого потока, характеристиках вентиляторов (напор и потоки), потребности в вентиляционных окнах и дополнительных вентиляторах, газовых потоках и концентрациях загрязнений. Можно установить в нужном месте вентилятор и проверить результаты его работы. В случае необходимости пакет смоделирует существующие вентиляционные сети и представит все их характеристики. Есть возможность смоделировать проектные сети во многих вариантах и получить оптимальные решения. Несмотря на то, что пакет предоставляет более широкие

возможности по анализу вариантов проектных сетей с различным расположением местных регуляторов, в нем отсутствуют инструменты определения мест расположения регуляторов.

Горными инженерами из Южной Африки разработана интерактивная программа VUMA (Ventilation of Underground Mine Atmospheres) [87, 88]. Она позволяет одновременно моделировать не только вентиляционные потоки, но и распределение температуры, давления, влажности, концентрации вредных примесей в подземной шахтной сети. Программа имеет дружественный интерфейс, позволяющий быстро конструировать сети и проводить анализ вентиляции типа «что, если...». Разработчики программы полагают, что она может быть применена к разнообразным подземным способам добычи рудных тел и использована на шахтах с различным уровнем механизации.

Специалистами Института горного дела им. Д. А. Кунаева (Казахстан) разработана компьютерная программа расчета распределения воздуха в вентиляционных сетях шахт и рудников, применение которой позволяет проводить объективный анализ состояния вентиляции при любых изменениях технологии (в т. ч. на стадии проектирования) [89]. Возможности программы предопределяют оперативное реагирование на фактические изменения в топологии или аэродинамике сложной сети выработок, «проигрывание» возможных аварийных и проектных ситуаций и недопущение появления негативных изменений в обеспечении воздухом действующих выработок.

Компания «ШАХТЭКСПЕРТ-Системы» [90] распространяет программный продукт «Вентиляция 2». Это специализированный программный комплекс для решения задач проветривания горных выработок и противоаварийной устойчивости горных предприятий — угольных шахт, рудников, тоннелей. Исходными данными для расчетов являются пространственная сеть горных выработок и расположенное в них оборудование и арматура: вентиляционные сооружения, вентиляторы, конвейерный транспорт, трубопроводные сети, места расположения вспомогательных элементов и спасательных средств.

Из пакетов, активно используемых на территории России, можно отметить программный комплекс «IRS Вентиляция ПЛА» производства «Интерсофт». Программное обеспечение содержит комплекс сервисных задач, позволяющих обновлять и поддерживать информацию о шахтной вентиляционной сети на основании замеров службы ВТБ, т. е. без проведения дополнительных общешахтных воздушно-депресссионных съемок. К достоинствам программы стоит отнести наглядное графическое отображение зоны задымления и мест опрокидывания вентиляционной струи при моделировании пожаров [91, 92], маршрутов эвакуации рабочих и маршрутов движения отделений ВГСЧ, направлений потоков воздуха, параметров выработок и т. п., а также возможность оперативного доступа к предварительно подготовленному с помощью программы «IRS Вентиляция — ПЛА» плану ликвидации аварий.

Однако модули программы «IRS Вентиляция ПЛА» содержат минимальное количество расчетных задач, будучи в основном ориентированными на автоматизацию составления плана ликвидации аварии на шахте.

Известной программой украинского производства (Донецк) является система РЕВОД (расчет естественного воздухораспределения и обработка депрессионной съемки), предназначенная для оперативного решения комплекса задач воздухораспределения в шахтных вентиляционных сетях

и ориентированная на применение в угольных шахтах [93, 94]. Основным набором исходных данных для системы РЕВОД является список ветвей и узлов вентиляционной сети с указанием их взаимосвязи, аэродинамические сопротивления ветвей и характеристики вентиляторов. Дополнительные данные (температура воздуха в узлах сети, метановыделение, отводы и др.) расширяют функциональный набор получаемых решений.

Система РЕВОД позволяет:

- решать задачи естественного воздухораспределения в нормальном и реверсивном режимах проветривания для сетей, содержащих до 1400 ветвей;
- оперативно осуществлять выбор эффективных режимов проветривания шахт и отдельных выработок при авариях;
- учитывать естественную тягу;
- выполнять расчет энергозатрат по объектам проветривания;
- определять степень влияния каждого вентилятора главного проветривания на проветривание отдельных выработок.

Отдельные инструменты предназначены для выполнения анализа устойчивости вентиляционной сети при нормальных условиях проветривания, при пожарах по заданным тепловым депрессиям, при последовательном обрушении пород выработок и разрушении вентиляционных сооружений. Наиболее интересными являются возможности программы по регулированию воздухораспределения в шахтных сетях и определению наличия в сети рециркуляционных контуров, особо важные для обеспечения безопасности метаноопасных шахт. К сожалению, по ряду причин разработка и поддержка программы была остановлена.

Н. М. Кравченко с коллегами создана компьютерная программа «Вентиляция шахт» [95–97]. Этот программный продукт, наряду с задачами расчета и анализа воздухораспределения в сети выработок (нормальные и аварийные режимы), решает новые задачи: построение депрессиограмм и потенциальных схем, расчет общешахтного баланса воздуха, расчет распределения газов в сети с оценкой взрывоопасности, выбор оптимальных маршрутов выхода людей при пожарах и путей движения горноспасателей; расчет параметров регуляторов, выбор необходимых вентиляторов и режимов их работы для проектируемых сетей; расчет устойчивости проветривания очистных выработок, выемочных участков, тупиковых забоев и т. д. По мнению авторов программы, наибольшую пользу от применения комплекса «Вентиляция шахт» следует ожидать на шахтах и рудниках, проветриваемых несколькими вентиляторами, где добыча полезных ископаемых ведется на больших глубинах, на нескольких пластах одновременно. В целом широкое внедрение компьютерного моделирования вентиляционных сетей с помощью комплекса «Вентиляция шахт» для решения задач техносферной безопасности способствует повышению профессионального уровня и квалификации специалистов пылевентиляционных служб и служб охраны труда.

Программа института «Гипроуголь» также ориентирована на работу с шахтными вентиляционными сетями [98, 99]. Ее функциональные возможности позволяют рассчитывать естественное распределение воздуха по заданным характеристикам сети и вентиляторов, определять оптимальное распределение воздуха для обеспечения потребителей, рассчитывать устойчивость

проветривания, концентрации газов и времени распространения пожаров. Однако особенности угольных шахт таковы, что регулирование распределения воздуха в сети осуществляется по соображениям безопасности только с помощью ВГП и перемычек, вспомогательные вентиляторы не используются.

В рамках нескольких отечественных проектов по разработке автоматических систем оперативного управления также были реализованы программы, позволяющие определить параметры установленных регуляторов, необходимые для максимально эффективного проветривания шахты, но проблема поиска вариантов расположения регуляторов относится к долгосрочному планированию вентиляции рудника и в таких программных пакетах не решается.

Комплекс «Аэросеть», разработанный в Горном институте УрО РАН (разработчик Ю. В. Круглов с коллегами) [100–102], позволяет определять параметры автоматических вентиляционных дверей с целью минимизации потребления электроэнергии главными вентиляционными установками, а также учитывать при расчете подземные вспомогательные вентиляторные установки, производить оценку рециркуляции, возникающей в сети. В состав программно-вычислительного комплекса входят несколько модулей: расчетный, «Электронный расчет количества воздуха и вентиляционный журнал» и «Электронный план ликвидации аварий».

В Горном институте КНЦ РАН для системы автоматизированного проектирования вентиляции рудников разработан комплекс программ САПР ВС (А. Д. Вассерман, В. В. Осинцев) [80]. Информация о возможностях этой программы, ее достоинствах и замеченных в процессе эксплуатации недостатках, потребовавших ее модернизации на основе новых методов выбора параметров регуляторов и оптимизации их размещения, усовершенствования алгоритма расчета распределения воздуха в сети, приводятся авторами монографии в главах 1.2 и 1.3.

Подводя итоги проведенного анализа программных пакетов, предназначенных для расчета вентиляции рудников, отметим, что зарубежные программы, безусловно, выигрывают у отечественных по графическому интерфейсу и функциональным возможностям, но не соответствуют единым правилам безопасности ведения горных работ в подземных рудниках, что ограничивает возможность их применения в России. Отечественные разработки касаются преимущественно угольных шахт. Пакет «IRS Вентиляция ПЛА» применим к рудным месторождениям, но не позволяет гибко решать задачу регулирования сети.

Таким образом, разработанные в настоящее время отечественные и зарубежные программные пакеты расчета вентиляции подземного рудника не позволяют производить поиск оптимальных вариантов расположения местных регуляторов воздухораспределения в сложных гетерономных вентиляционных сетях.

### **1.1.3. Выводы по главе 1.1**

1. Разработанные методы расчета распределения воздуха не позволяют распространить основные принципы расчета на оптимизацию расположения регуляторов в общей постановке.

2. Существующие методы регулирования распределения воздуха в сети обладают рядом недостатков, не позволяющих применять их для автоматизации процесса принятия решений по выбору мест расположения, типам и параметрам регуляторов для сложных вентиляционных сетей при комбинированном способе проветривания.

3. В разработанных отечественных и зарубежных программных продуктах автоматизации расчета вентиляционных сетей не отражен в полной мере вопрос оптимизации размещения и параметров регуляторов в вентиляционных сетях.

## **1.2. Теоретические основы метода оптимизации размещения регуляторов в вентиляционной сети рудника**

### **1.2.1. Анализ взаимосвязи параметров вентиляционной системы**

Задача выбора 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. Сразу уточним, что разработанный метод не является полностью автоматическим и не позволяет во всех случаях по введенной топологии отрегулировать сеть [103]. Проектировщик, работающий с методическим и программным обеспечением, должен использовать свой опыт ручного регулирования, чтобы указать, какие ветви сети являются регулируемыми и заданными.

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), а также указана (пользователем) возможность изменения параметров. Например, для установленной глухой изолирующей перемычки сопротивление не может быть изменено, поэтому соответствующую ветвь не стоит относить к множеству регулируемых ветвей.

Наиболее интересным аспектом разработанного метода, принципиально отличающим его от других 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 выбор типа программным путем. По мере увеличения множества регулируемых ветвей увеличивается матрица взаимосвязи параметров сети и число сгенерированных программой вариантов, поэтому грамотный начальный выбор потенциальных мест регулирования сети может значительно повлиять на успешность и эффективность решения задачи.

Для любой ветви сети, отмеченной как «регулируемая», могут быть заданы предельные значения параметра — депрессии (для вентилятора), сопротивления (для перемычки). Заданные граничные значения будут использованы на этапе подбора конкретных параметров для выбранного варианта регулирования. Грамотное ограничение области изменения значений параметров для разных выработок может значительно ускорить процесс подбора и сделать его эффективнее. Сама процедура подбора значений параметров с помощью

генетического алгоритма требует задания предельных значений сопротивления и депрессии, поэтому в том случае, если не заданы границы для отдельных ветвей, будут учтены только общие для всех ветвей граничные значения. Результатом работы алгоритма в этом случае может стать набор практически недостижимых значений параметров.

Другим множеством ветвей, которое также определяется пользователем, является совокупность заданных ветвей — тех выработок, для которых пользователь ограничил потоки воздуха.

Сам процесс решения является, по сути своей, итерационным, а именно состоит из следующих повторяющихся этапов:

- 1) расчет распределения воздуха в системе;
- 2) определение с помощью соответствующих инструментов редактора топологии ветвей, скорости воздуха в которых ниже или выше требуемых по ПБ;
- 3) задание предельных значений потоков воздуха в этих ветвях;
- 4) корректировка множества регулируемых ветвей и предельных значений параметров;
- 5) анализ взаимосвязи параметров сети;
- 6) выбор одного из предложенных системой варианта;
- 7) задание общих предельных значений сопротивления и депрессии регуляторов и других параметров алгоритма поиска (вероятность операторов «скрещивания» и «мутации», количество «хромосом» в одном «поколении», минимальное изменение лучшего значения функции «приспособленности» за одно «поколение»), выбор критерия оптимизации;
- 8) запуск генетического алгоритма;
- 9) оценка полученных результатов;
- 10) если в результате не получено требуемое распределение воздуха, следует скорректировать предельные значения параметров и повторить процесс оптимизации с помощью генетического алгоритма;
- 11) если нужный результат не достигнут или найденные значения параметров практически нереализуемы — возврат к списку вариантов и выбор другого варианта;
- 12) если ни один вариант не позволяет отрегулировать сеть — возврат к топологии сети и редактирование предельных значений потоков по заданным ветвям, набора регулируемых ветвей и их параметров, самой топологии проектируемой системы;
- 13) если результат достигнут (потоки в заданных ветвях отрегулированы в заданных пределах и затрачиваемая на проветривание мощность устраивает проектировщика), потребуется оценка вентиляционной сети с полученным распределением воздуха с целью поиска новых ветвей, скорости воздуха в которых не соответствуют ПБ, и включения их во множество заданных ветвей;
- 14) если таких ветвей найти не удалось (сеть отрегулирована в соответствии с нормами безопасного ведения горных работ и параметры регуляторов практически достижимы), необходим окончательный выбор из базы данных вентиляторов с подходящими аэродинамическими характеристиками и расчет сечений окон перемычек;
- 15) необходима оценка гигиенической безопасности и эффективности проветривания по принятым критериям.

Далее рассмотрим разработанный алгоритм анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети. Под «коэффициентом взаимосвязи» двух ветвей будем понимать величину, определяемую по формуле

$$kKor_i^j = \frac{(Q_j^{(1)} - Q_j^{(0)})}{|Q_i^{(1)} - Q_i^{(0)}|},$$

где  $Q_i^{(0)}$  и  $Q_j^{(0)}$  — начальные расходы воздуха в  $i$ -й и  $j$ -й ветвях соответственно, м<sup>3</sup>/с;  $Q_i^{(1)}$  и  $Q_j^{(1)}$  — расходы воздуха в этих же ветвях после вариации одного из аэродинамических параметров (сопротивления или депрессии)  $i$ -й ветви, м<sup>3</sup>/с.

Таким образом,  $i$ -я ветвь обязательно должна принадлежать множеству регулируемых ветвей. Данный коэффициент характеризует степень влияния изменения потока воздуха в одной ветви на расход воздуха в другой ветви [104]. Процедура анализа взаимосвязи параметров сети в такой постановке подразумевает именно расчет матрицы коэффициентов взаимосвязи расходов воздуха в заданных и регулируемых ветвях. Осуществляется также расчет матрицы взаимосвязи расходов воздуха регулируемых ветвей между собой.

На первом этапе решается стандартная задача расчета исходного воздухораспределения в вентиляционной сети при начальных значениях аэродинамических сопротивлений ветвей и депрессий местных вентиляторов. Исходные значения параметров регулируемых ветвей (расход воздуха  $Q_{rn}$ , сопротивление  $R_{rn}$ , депрессия местного вентилятора  $H_{rn}$ ) запоминаются в качестве начального приближения перед расчетом матриц взаимосвязи параметров.

Из общего числа коэффициентов взаимосвязи (взаимного влияния) всех ветвей системы можно выделить:

- матрицу взаимосвязи регулируемых и заданных ветвей ( $V_r$ ,  $V_z$ )

$$A_{ijk}^z = \frac{Q_{zj} - Q_{zjn}}{|Q_{ri} - Q_{rin}|},$$

- матрицу взаимосвязи регулируемых ветвей между собой ( $V_r$ ,  $V_z$ )

$$A_{ijk}^r = \frac{Q_{rj} - Q_{rjn}}{|Q_{ri} - Q_{rin}|},$$

где  $ri, rj, zj$  — индексы регулируемых и заданных ветвей соответственно;  $n$  — индекс исходного расхода воздуха;  $k$  — индекс вида регулирования.

При определении знака коэффициента взаимосвязи используются специальные правила. В двух случаях знак коэффициента меняется на противоположный:

при ( $Q_j < 0$  и  $Q_{jn} < 0$ );

при ( $sign(Q_j) \neq sign(Q_{jn})$  и  $A_{ijk} > 0$ ),

где  $Q_{jn}$  и  $Q_j$  — расход воздуха определенной ветви до и после изменения расхода в регулируемой ветви, м<sup>3</sup>/с;  $A_{ijk}$  — расчетное значение коэффициента взаимосвязи.

Общий принцип расчета матриц взаимосвязи заключается в следующем. В каждой регулируемой ветви по порядку вносится изменение (вариация, положительное или отрицательное приращение) одного из аэродинамических параметров (сопротивления или депрессии дополнительного источника). Поскольку параметров всего два, существует четыре вида регулирования расхода воздуха в ветви: положительное и (по возможности) отрицательное приращение сопротивления (перемычка), положительное и отрицательное приращение депрессии источника. После изменения одного из параметров происходит пересчет воздухораспределения в системе и сопоставление изменения расхода воздуха в соответствующей регулируемой ветви с изменением расхода воздуха в других регулируемых и заданных ветвях. Полученные коэффициенты взаимосвязи с определенными знаками вносятся в матрицы. Далее возвращается первоначальное значение варьируемого параметра ветви и осуществляется переход к следующему параметру или к следующей ветви. Когда обход всех регулируемых ветвей и всех видов регулирования закончен, расчет матриц взаимосвязи завершен.

Отметим, что не для каждой регулируемой ветви могут быть использованы все четыре вида регулирования. Для ветви без регуляторов отрицательное приращение сопротивления (снижение  $R_{rn}$ ) невозможно в принципе. Установка перемычки в такой ветви может только увеличить сопротивление, а отрицательное приращение депрессии источника (т. е. установка вентилятора с напором против потока воздуха), как правило, не имеет смысла, проще установить перемычку. Соответствующие коэффициенты взаимосвязи устанавливаются равными нулю. Также нулевым считается коэффициент взаимосвязи ветви, для которой вариация параметра не привела к изменению потока воздуха в ней.

В методе рассматриваются следующие варианты [104]:

- для ветвей без регуляторов предусматривается установка перемычки (приращение  $+\Delta R$ ) или дополнительного вентилятора ( $+\Delta H_v$ );
- для ветвей с перемычкой предусматривается только вариация сопротивления (приращения  $+\Delta R$  и  $-\Delta R$ );
- для ветвей с местным вентилятором предусматривается только вариация депрессии вентилятора (приращения  $+\Delta H_v$  и  $-\Delta H_v$ ).

На рис. 1.1 представлена блок-схема алгоритма расчета коэффициентов взаимосвязи.

Знак коэффициента взаимосвязи имеет решающее значение при определении эффективности регулируемой ветви, так как от знака зависит направление регулирования, подходящее для данной заданной ветви или нет. Если необходимо увеличить поток воздуха, проходящего через заданную ветвь, то подходящим будет положительный коэффициент взаимосвязи, иначе — отрицательный.

Для оценки эффективности регулируемой ветви после расчета матриц взаимосвязей определяется матрица направлений регулирования. Каждый элемент этой матрицы  $D_{ijk}$  показывает, является ли определенный  $k$ -й вид регулирования (из четырех вышеуказанных) в  $i$ -й регулируемой ветви подходящим для данной  $j$ -й заданной ветви. Подходящему направлению соответствует 1, неподходящему — 0.

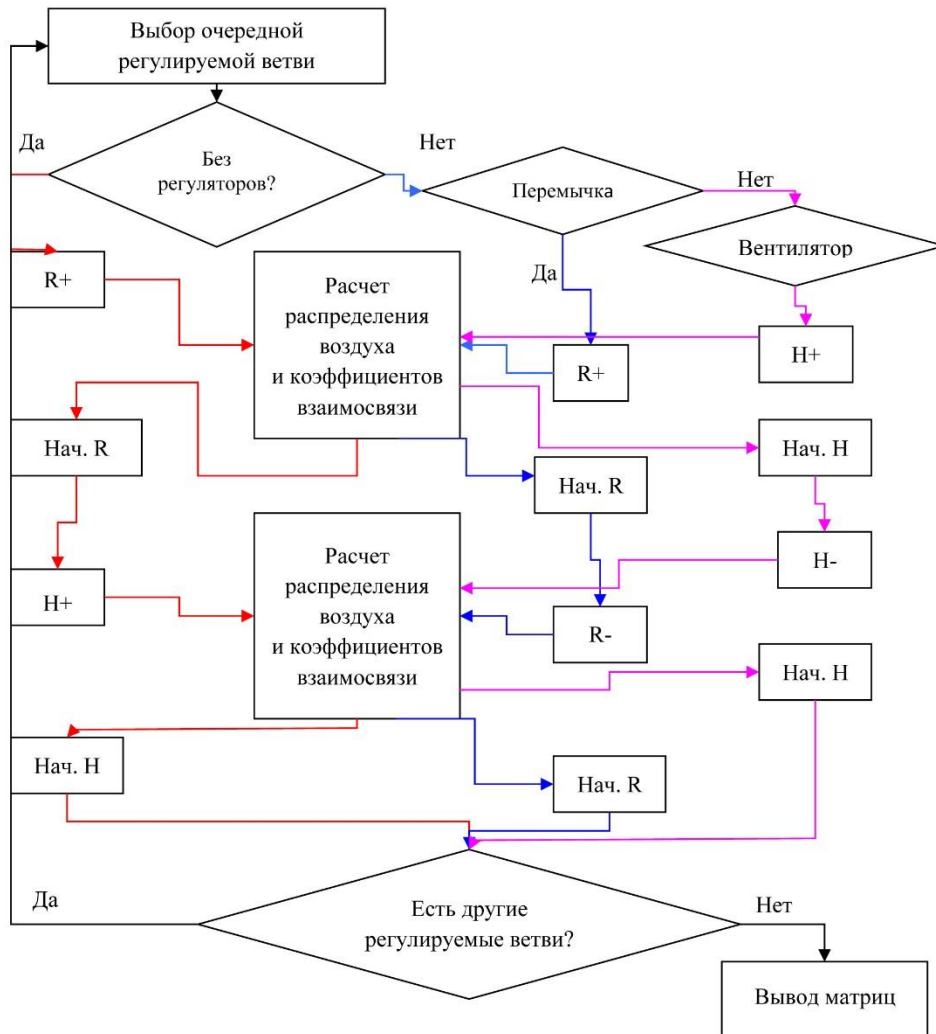


Рис. 1.1. Блок-схема расчета коэффициентов взаимосвязи

Подходящим считается такое направление регулирования, когда:

1.  $|Q_{zjn}| < Q_{\max}$  и  $A_{ijk}^z > 0,01$ , т. е. исходный расход воздуха в заданной ветви меньше максимально допустимого при положительном и значимом (по величине) коэффициенте взаимосвязи.

2.  $|Q_{zjn}| > Q_{\min}$  и  $A_{ijk}^z < -0,01$ , т. е. исходный расход воздуха в заданной ветви больше минимально допустимого при отрицательном и значимом (по величине) коэффициенте взаимосвязи.

Для каждой регулируемой ветви рассматриваются четыре вида регулирования ( $k = 0 \dots 3$ ).

Определяется количество подходящих направлений:

$$kDir_{ik} = \sum_j D_{ijk},$$

где  $D_{ijk}$  — коэффициент направления регулирования для  $i$ -й регулируемой ветви и  $j$ -й заданной ветви при  $k$ -м виде регулирования.

После этого заполняется матрица суммарных коэффициентов взаимосвязей с учетом направлений:

$$s\text{Kor}_{ik} = \sum_j \delta_{ijk} |k\text{Kor}_{ijk}|, \text{ где } \delta_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{при } D_{ijk} = 1 \\ -1 & \text{при } D_{ijk} = 0 \end{cases}$$

После расчета матрицы направлений регулирования проводится проверка, возможно ли отрегулировать все заданные ветви с помощью всех имеющихся регулируемых ветвей. Для этого производится поиск хотя бы одного подходящего направления регулирования для каждой заданной ветви, то есть осуществляется перебор всех заданных ветвей и для каждой  $j$ -й из них ведется поиск хотя бы одного элемента матрицы направлений  $D_{ijk} = 1$ . Если такое условие выполняется, возможность регулирования системы считается теоретически установленной.

Таким образом, оценка эффективности регулируемой ветви может быть проведена по двум коэффициентам — по коэффициенту подходящих направлений (коротко — коэффициент направлений)  $K_D$  и коэффициенту взаимосвязей  $K_A$ .

$K_D$  — это количество заданных ветвей с подходящим направлением регулирования для каждой регулируемой ветви,  $K_A$  — это сумма коэффициентов взаимосвязей для каждой регулируемой ветви с учетом положительных (подходящих) и отрицательных направлений регулирования:

$$K_{Di} = \sum_k k\text{Dir}_{ik},$$

$$K_{Ai} = \sum_k s\text{Kor}_{ik}.$$

На следующем этапе решения задачи оптимального регулирования производится сортировка регулируемых ветвей по эффективности регулирования, то есть по величине коэффициента направлений и коэффициента взаимосвязей. В первую очередь оценивается коэффициент направлений, во вторую (при равных  $K_D$ ) — коэффициент взаимосвязей  $K_A$ . Отметим, что ветви сортируются по эффективности с учетом вида регулирования, поскольку расчет  $K_D$  и  $K_A$  можно провести только при определенном виде регулирования.

Полученный отсортированный список регулируемых ветвей является основой для генерации вариантов регулирования. Вариант регулирования потоков воздуха в системе — это набор регулируемых ветвей с определенными видами регулирования, который обеспечивает заданное воздушное распределение. Максимальное количество ветвей в варианте может быть равно количеству регулируемых ветвей  $\Sigma V_r$ , но если  $\Sigma V_r$  превышает количество заданных ветвей  $\Sigma V_z$ , то, как правило, можно ограничиться  $\Sigma V_z$ .

Варианты регулирования генерируются в программе стандартными методами комбинаторики: от одной ветви в варианте до максимального количества. Для отбора подходящих вариантов проводится анализ: регулируются ли все заданные ветви с помощью данного варианта и является ли суммарный коэффициент взаимосвязей для каждой заданной ветви положительным. Первая

проверка реализуется по коэффициентам направлений: для каждой заданной ветви в наборе регулируемых ветвей должна быть хотя бы одна, обеспечивающая подходящее направление регулирования. Вторая проверка гарантирует, что для каждой заданной ветви суммарное влияние всех регулируемых ветвей в наборе будет «подходящим» для выполнения задания. В целом отбор вариантов построен так, что в первую очередь рассматриваются варианты с минимальным количеством ветвей, поэтому ни один вариант, удовлетворяющий второму критерию оптимальности — минимуму регуляторов, не может быть пропущен [105].

Далее осуществляется проверка отобранных вариантов с учетом влияния регулируемых ветвей друг на друга, т. е. с учетом матрицы корреляции регулируемых ветвей. Для каждой регулируемой ветви  $j$  из конкретного варианта находится сумма коэффициентов взаимосвязей:

$$srKor_j = \sum_i A_{ijk}^r,$$

где рассматриваются все регулируемые ветви  $i$  с видом регулирования  $k$ , входящие в данный вариант. После чего для каждой заданной ветви определяется уточненный суммарный коэффициент взаимосвязей по всем регулируемым ветвям, входящим в данный вариант:

$$VKor_i = \sum_{j,k} \delta_{ijk} |kKor_{ijk}| \cdot |srKor_j|, \text{ где } \delta_{ijk} = \begin{cases} 1 \text{ при } D_{ijk} = 1 \\ -1 \text{ при } D_{ijk} = 0 \end{cases}.$$

Если для всех заданных ветвей уточненный суммарный коэффициент взаимосвязей значительно отличается от нуля, то такой вариант входит в окончательный список. Проведенные проверки показали принципиальную возможность выполнения задания с помощью рассматриваемого варианта регулирования, т. е. что при таком наборе регулируемых ветвей с определенными видами изменения параметров возможно получить для всех заданных ветвей изменение расходов воздуха в требуемом направлении.

Оценка достижимости собственно заданных диапазонов воздуха для каждой заданной ветви является уже существенно более сложной задачей и требует для каждой регулируемой ветви задания конкретных пределов изменения сопротивления и депрессии. На этапе проектирования такие пределы установить часто довольно трудно, и речь может идти скорее о ручном изменении пределов в зависимости от того, насколько выполнены задания по потокам воздуха или корректировки задания по потокам, а может быть, и самой топологической схемы сети. На этом этапе требуется участие проектировщика, и проверка конкретного варианта на достижимость становится человеко-машинной процедурой, требующей многократного пересчета распределения воздуха.

Результатом анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети являются отсортированные по эффективности и прошедшие все проверки варианты регулирования [106]. Для этого в алгоритме используется коэффициент эффективности варианта регулирования:

$$K_A^{\tilde{V}_r} = \sum_i K_{Ai}, i \in \tilde{V}_r,$$

где  $\tilde{V}_r$  — вариант регулирования.



Рис. 1.2. Блок-схема алгоритма анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети

Как следует из формулы, коэффициент эффективности каждого варианта регулирования — это сумма уточненных коэффициентов взаимосвязей  $K_{Ai}$  всех заданных ветвей варианта, относительно регулируемых, вошедших в вариант. По сути, коэффициент эффективности показывает, что предлагаемый вариант регулирования позволяет в сумме изменить потоки воздуха в заданных ветвях на рассчитанную величину. Более эффективными считаются варианты, позволяющие при одинаковом изменении сопротивлений или депрессий регуляторов в разных ветвях получить более высокое суммарное изменение потоков воздуха в заданных ветвях. Эффективность варианта, определенная таким образом, далеко не всегда означает его большую пригодность для достижения конкретных диапазонов потоков в этих ветвях, так как окончательное изменение потоков может оказаться слишком сильным или недостаточным в некоторых ветвях. Поскольку величина коэффициента взаимосвязи двух ветвей непосредственно связана с величиной изменения расхода воздуха, то чем выше коэффициенты взаимосвязи всех ветвей варианта, тем выше эффективность варианта в целом и, соответственно, меньше мощность, потребляемая на обеспечение заданного распределения воздуха. Таким способом в решении задачи учитывается принцип минимальной полезной мощности.

Полученные списки отсортированных по эффективности регулируемых ветвей и вариантов регулирования выводятся в программе в виде таблиц. Пользователь программы имеет возможность выбрать любой из вариантов регулирования или из регулируемых ветвей и составить собственный. Для конкретного варианта дальнейшая оценка достижимости целей регулирования и оптимизация параметров регуляторов в соответствии с выбранным критерием осуществляется с помощью генетического алгоритма.

Блок-схема общего алгоритма анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети представлена на рис. 1.2.

### **1.2.2. Генетический алгоритм поиска оптимальных параметров регуляторов**

Применение генетического алгоритма для оптимизации параметров регуляторов воздухораспределения обусловлено необходимостью найти конкретное практическое решение задачи регулирования. В результате анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети находится список вариантов размещения регуляторов в системе, отсортированный по эффективности, а также отсортированный список регулируемых ветвей. Дальнейшее решение задачи регулирования направлено на поиск конкретных параметров регуляторов для выбранного варианта, отвечающим тем или иным критериям оптимизации.

В качестве первого критерия оптимизации был установлен критерий минимальной суммарной невязки расходов воздуха по заданным ветвям при интервальном ограничении потоков воздуха:

$$N_{\text{res}} = \min\left(\sum_{i=1}^k |Q_i - Q_i^z|\right),$$

где  $Q_i$  — расход воздуха в  $i$ -й ветви,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_i^z$  — предельный (максимальный или минимальный) расход воздуха в  $i$ -й заданной ветви,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $k$  — общее количество заданных ветвей.

Задание интервалов  $(\min Q_i^z, \max Q_i^z)$  позволяет найти варианты регулирования, в которых общее количество регуляторов меньше количества заданных ветвей. Поэтому установленный критерий минимальной суммарной невязки с учетом интервалов по всем заданным ветвям дает возможность найти более экономичные варианты регулирования.

Выбран критерий, учитывающий полезную мощность, затрачиваемую на проветривание сети:

$$N_{\text{pow}} = \min\left(\sum_i (R_{\text{кви}} Q_i^3 + R_{\text{лини}} Q_i^2)\right),$$

где  $R_{\text{кви}}$  — квадратичная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ ,  $R_{\text{лини}}$  — линейная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^5$ .

Установлен также взвешенный критерий, учитывающий мощность, затрачиваемую на проветривание сети, и суммарную невязку расходов воздуха:

$$N = \min\left(\mu_{\text{pow}} \sum_i (R_{\text{кви}} Q_i^3 + R_{\text{лини}} Q_i^2) + \mu_{\text{res}} \sum_{i=1}^k |Q_i - Q_i^z|\right),$$

где  $\mu_{\text{res}}$  — весовой коэффициент для суммарной невязки и  $\mu_{\text{pow}}$  — весовой коэффициент для мощности.

Критерий минимального количества регуляторов в оптимизации их параметров не учитывается, поскольку на этом этапе уже выбран конкретный вариант расположения в ветвях сети регуляторов определенных типов.

Так как пассивные регуляторы (перемычки) увеличивают полезную мощность, варианты только отрицательного регулирования будут уступать по эффективности вариантам с вентиляторами. Для определенных условий добиться требуемого перераспределения воздуха без применения вспомогательных вентиляторов невозможно для заданной топологии и заданного набора регулируемых ветвей. С другой стороны, многие варианты с вентиляторами вспомогательного проветривания могут оказаться невыполнимыми в связи с невозможностью установки в выбранной ветви вентилятора или отсутствия в базе вентилятора, работающего в требуемом режиме. В метаноопасных шахтах применение вспомогательных вентиляторов запрещено требованиями безопасности, так что для таких вентиляционных систем следует рассматривать только варианты с перемычками [107].

Анализ взаимосвязи параметров сети представляет ценность как предварительная оценка и нахождение наиболее эффективных вариантов регулирования — тех ветвей, в которых требуются наименьшие вариации аэродинамических параметров для установления требуемых расходов воздуха в заданных ветвях. Однако минимальные вариации депрессии зачастую для конкретной задачи регулирования могут оказаться намного меньше практически выполнимых.

Требуется проверка выбранного варианта: поиск конкретных значений аэродинамических параметров выбранных регулируемых ветвей, обеспечивающих минимальные невязки расходов в заданных ветвях, расчет воздухораспределения во всей сети с найденными значениями параметров и оценка полученного результата. Далее может производиться оценка другого варианта и сравнение полученной невязки, полезной мощности и числа регуляторов. При равных невязках предпочтение может быть отдано варианту с меньшей полезной мощностью или меньшим числом регуляторов.

Цель оптимизации с помощью генетического алгоритма состоит в том, чтобы найти оптимальные параметры регуляторов по одному или нескольким критериям. Чтобы реализовать алгоритм, нужно сначала выбрать подходящую структуру для представления этих решений. В постановке задачи поиска экземпляра этой структуры данных представляет точку в пространстве поиска всех возможных решений.

Структура данных генетического алгоритма состоит из одной или большего количества «хромосом» (обычно из одной). Как правило, «хромосома» — это битовая строка, так что термин «строка» часто заменяет понятие «хромосома». В принципе, данные методы не ограничены бинарным представлением. Известны другие реализации, построенные исключительно на векторах вещественных чисел [47]. Несмотря на то, что для многих реальных задач, видимо, больше подходят строки переменной длины, в настоящее время структуры фиксированной длины наиболее распространены и изучены.

Чтобы оптимизировать структуру, используя генетический алгоритм, нужно задать некоторую меру качества для каждой структуры в пространстве поиска. Для этой цели используется функция «приспособленности». В функциональной максимизации целевая функция часто сама выступает в качестве функции «приспособленности»; для задач минимизации целевую функцию следует инвертировать и сместить затем в область положительных значений.

Простой генетический алгоритм случайным образом генерирует начальную «популяцию» структур. Работа алгоритма представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не будет создано заданное число «поколений» или не будет выполнен какой-либо иной критерий остановки. Для каждого «поколения» реализуется отбор пропорционально «приспособленности», односточное «скрещивание» и «мутация». Сначала пропорциональный отбор назначает каждой структуре вероятность  $Ps_i$ , равную отношению ее «приспособленности» к суммарной «приспособленности популяции»:

$$Ps_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \cdot$$

Затем происходит отбор (с замещением) всех  $n$  «особей» для дальнейшей «генетической» обработки, согласно величине  $Ps_i$ . Простейший пропорциональный отбор отбирает «особей» с помощью  $n$  «запусков» рулетки [20]. Колесо рулетки содержит по одному сектору для каждого члена «популяции». Размер  $i$ -го сектора пропорционален соответствующей величине  $Ps_i$ . При таком отборе члены «популяции» с более высокой «приспособленностью» с большей вероятностью будут чаще выбираться, чем «особи» с низкой «приспособленностью».

После отбора  $n$  выбранных «особей» подвергают «скрещиванию» (иногда называемому «рекомбинацией» или «кроссовером») с заданной вероятностью  $P_{\text{cross}}$ ;  $n$  строк случайным образом разбивают на  $n/2$  пары. Для каждой пары с вероятностью  $P_{\text{cross}}$  может применяться «скрещивание». Соответственно с вероятностью  $1 - P_{\text{cross}}$  «скрещивания» не происходит и неизменные «особи» переходят на стадию «мутации». Если «скрещивание» происходит, полученные «потомки» заменяют собой «родителей» и переходят к «мутации».

Одноточечное «скрещивание» работает так: сначала случайным образом выбирается одна из точек разрыва, которыми называют участки между соседними битами в строке, обе «родительские» структуры разрываются на два сегмента по этой точке, затем соответствующие сегменты различных «родителей» склеиваются и получаются два «генотипа потомков».

После того как закончится стадия «скрещивания», выполняются операторы «мутации». В каждой строке, которая подвергается «мутации», каждый бит с вероятностью  $P_m$  изменяется на противоположный. «Популяция», полученная после «мутации», записывается поверх старой, и этим цикл одного «поколения» завершается. Последующие «поколения» обрабатываются таким же образом: отбор, «кроссовер» и «мутация».

В настоящее время исследователи генетических алгоритмов предлагают много других операторов отбора, «скрещивания» и «мутации». Вот лишь наиболее распространенные из них, прежде всего, турнирный отбор [49]. Турнирный отбор реализует  $n$  турниров, чтобы выбрать  $n$  «особей». Каждый турнир построен на выборке  $k$  элементов из «популяции» и выборе лучшей «особи» среди них. Наиболее распространен турнирный отбор с  $k = 2$ .

Элитные методы отбора [108] гарантируют, что при отборе обязательно будет выживать лучший или лучшие члены «популяции» (иначе называется стратегией элитизма). Наиболее распространена процедура обязательного сохранения только одной лучшей «особи», если она не прошла, как другие, через процесс отбора, «скрещивания» и «мутации». Элитизм может быть внедрен практически в любой стандартный метод отбора.

Двухточечный оператор «скрещивания» и равномерный «кроссовер» — вполне достойные альтернативы одноточечному оператору [109]. В двухточечном «кроссовере» выбираются две точки разрыва, и родительские «хромосомы» обмениваются сегментом, который находится между двумя этими точками. В равномерном «кроссовере» каждый бит первого «родителя» наследуется первым «потомком» с заданной вероятностью, в противном случае этот бит передается второму «потомку» и наоборот.

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  $R^+$  или  $R^-$ , а также депрессии вентиляторов для ветвей, в которых регулирование осуществляется посредством вентилятора  $H^+$  или  $H^-$ . 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.

Если для отдельных регулируемых ветвей заданы свои интервалы изменения сопротивления или депрессии вентилятора, то значения «генов» будут выбираться именно из этих интервалов, а не из общих.

Сразу после определения пользователем границ интервалов выполняется проверка сопоставимости с ними текущих значений сопротивлений и депрессий всех ветвей исследуемого варианта. В следующих случаях требуется откорректировать границы интервалов:

- если вид регулирования для ветви  $R^+$ , а аэродинамическое сопротивление превышает максимальное значение сопротивления  $R_v > R_{\max}$ ;
- если вид регулирования для ветви  $R^-$  (что возможно только для ветви с установленной перемычкой), а аэродинамическое сопротивление ветви при полном открытии окна превышает максимальное значение сопротивления  $R_v - R_{\text{пер}} > R_{\max}$ ;
- если вид регулирования для ветви  $R^-$ , а аэродинамическое сопротивление ветви меньше минимального значения сопротивления  $R_v < R_{\min}$ ;
- если вид регулирования для ветви  $H^+$ , а заданное значение депрессии вентилятора превышает максимальное значение по модулю  $|C_v| > H_{\max}$ ;
- если вид регулирования для ветви  $H^-$ , а заданное значение депрессии вентилятора меньше минимального значения по модулю  $|C_v| < H_{\min}$ .

Далее представим описание собственно алгоритма перевода целочисленного значения «гена» в значение параметра. Номер «гена» по порядку соответствует порядковому номеру регулируемой ветви в списке ветвей для данного варианта, вид регулирования также зафиксирован в том же списке.

Разрядность «гена» для удобства двоичного кодирования может быть выбрана из 8, 16 или 32 бит при инициализации переменных. Сразу определяется количество целых чисел, которые можно закодировать с помощью выбранного представления «гена»:  $\text{PerLen} = 2^n$ , где  $n$  — количество бит.

Пусть  $X$  — целочисленное значение  $i$ -го «гена хромосомы».

I. Если вид регулирования для  $i$ -й ветви варианта  $R^+$ , то выполняем проверку сопротивления.

1. Если заданное значение сопротивления ветви меньше минимального значения  $R_v < R_{\min}$ , то текущее значение сопротивления данной ветви находим в заданном интервале:

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

2. В противном случае находим значение сопротивления из интервала  $(R_{\max} - R_v)$  по формуле

$$R = R_v + (R_{\max} - R_v) \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

II. Если вид регулирования для  $i$ -й ветви варианта  $R^-$ , то выполняем проверку сопротивления для ветви с перемычкой.

1. Если заданное аэродинамическое сопротивление ветви меньше максимального значения  $R_v < R_{\max}$  и при полном открытии окна сопротивление больше минимального значения  $R_v - R_{\text{пер}} > R_{\min}$ , то текущее значение сопротивления находим в интервале  $(R_v - R_{\text{пер}}; R_v)$  по формуле

$$R = (R_v - R_{\text{пер}}) + R_{\text{пер}} \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

2. Если заданное аэродинамическое сопротивление ветви превышает максимальное значение  $R_v > R_{\max}$  и при полном открытии окна сопротивление больше минимального значения, то текущее значение сопротивления находим в интервале  $(R_v - R_{\text{пер}}; R_{\max})$  по формуле

$$R = (R_v - R_{\text{пер}}) + (R_{\max} - (R_v - R_{\text{пер}})) \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

3. Если заданное аэродинамическое сопротивление ветви больше максимального значения  $R_v > R_{\max}$  и при полном открытии окна сопротивление меньше минимального значения  $R_v - R_{\text{пер}} < R_{\min}$ , то текущее значение сопротивления находим в интервале  $(R_{\min}; R_{\max})$  по формуле

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

4. Если заданное аэродинамическое сопротивление ветви меньше максимального значения  $R_v > R_{\max}$  и при полном открытии окна сопротивление меньше минимального значения  $R_v - R_{\text{пер}} < R_{\min}$ , то текущее значение сопротивления находим в интервале  $(R_{\min}; R_v)$  по формуле

$$R = R_{\min} + (R_v - R_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}.$$

III. Если вид регулирования  $H^+$ , то выполняем проверку депрессии вентилятора.

1. Если заданная депрессия вентилятора отлична от нуля и меньше минимального значения  $0 < |C| < H_{\min}$ , то депрессия определяется из заданного интервала, но с сохранением заданного знака во избежание опрокидывания струи по формуле:

$$C = \text{sign}(C_v) \cdot (H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}).$$

2. Если заданная депрессия вентилятора отлична от нуля и больше минимального значения  $|C| > H_{\max}$ , то она определяется из интервала  $(|C_v|, H_{\max})$ , но с сохранением заданного знака во избежание опрокидывания струи по формуле

$$C = \text{sign}(C_v) \cdot (|C_v| + (H_{\max} - |C_v|) \cdot |X| / \text{PerLen}).$$

3. Если депрессия вентилятора не задана  $C_v = 0$ , то она определяется из заданного интервала, но со знаком, противоположным знаку рассчитанного расхода воздуха, во избежание опрокидывания струи по формуле

$$C = -\text{sign}(Q_v) \cdot (H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}).$$

IV. Если вид регулирования Н–, проверяем депрессию вентилятора.

1. Если заданная депрессия вентилятора больше максимального значения  $|C_v| > H_{\max}$ , то находим текущее значение депрессии из заданного интервала с сохранением знака по формуле

$$C = \text{sign}(C_v) \cdot (H_{\min} + (H_{\max} - H_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}).$$

2. Иначе находим текущее значение депрессии из интервала  $(H_{\min}, |C_v|)$  по формуле:

$$C = \text{sign}(C_v) \cdot (H_{\min} + (|C_v| - H_{\min}) \cdot |X| / \text{PerLen}).$$

Таким путем осуществляется преобразование целочисленных значений «генов» в вещественные значения параметров. Сами значения «генов» при этом выбираются в интервале  $(0; \text{PerLen})$ . Описанная 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. При реализации алгоритма было решено предусмотреть возможность выбора пользователем программы минимизируемого критерия из числа установленных критериев: минимальной суммарной невязки по заданным ветвям с учетом интервального ограничения, минимальной полезной мощности или взвешенного критерия. Наиболее интересные результаты были получены при выборе критерия минимальной суммарной невязки потоков воздуха и последующей оценке мощности, затрачиваемой на проветривание.

Теперь подробнее опишем алгоритм определения значения функции «приспособленности» для конкретного набора параметров регулируемых ветвей, процедура расчета которых по значениям «генов» была представлена выше. Начнем со случая, когда пользователь задал критерий суммарной невязки по расходам воздуха в заданных ветвях. Критерий этот имеет прямое отношение к эффективности регулирования, так как показывает, насколько данный набор регуляторов с рассчитанными параметрами позволяет добиться заданных потоков воздуха в ветвях системы.

На этапе анализа взаимосвязи параметров сети была установлена принципиальная пригодность данного варианта регулирования, но не проверялась возможность достижения заданных диапазонов по расходам воздуха для определенных диапазонов значений регуляторов (сопротивления и депрессии). Поэтому вполне может оказаться, что для данного варианта нет параметров регуляторов в практически реализуемых интервалах, которые позволили бы привести все потоки воздуха к заданным интервалам. Для того чтобы этого проверить, нужно предварительно задать интервалы по регулируемым параметрам и запустить генетический алгоритм с выбранным первым критерием оптимизации.

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 (процедура расчета подробно описана в § 1.2.3). По полученному новому распределению воздуха определяется значение функции «приспособленности»  $fit$  в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Если в данной ветви необходимо получить поток воздуха не менее  $Q_{\min i}$ , то  $fit = fit + (Q_{\min i} - |Q_i|)$ , при условии, что полученный поток по модулю меньше требуемого минимального значения и по направлению совпадает с первоначальным потоком в этой ветви до регулирования. Если же направление полученного потока не совпадает с исходным направлением, т. е. струя воздуха в данной ветви перевернута, то  $fit = fit + (Q_{\min i} - (-\text{sign}(Q_i)) \cdot Q_i)$ .

2. Если в данной ветви необходимо получить точное значение потока  $Q_{zi}$ , то при условии, что струя воздуха после регулирования не перевернута и полученный поток отличается от требуемого больше, чем на  $\varepsilon = 0,01$ , к суммарной невязке прибавляется величина  $fit = fit + |(Q_{zi} - |Q_i|)|$ . Если же направление струи воздуха в ветви после регулирования изменилось на противоположное, то  $fit = fit + (Q_{zi} - (-\text{sign}(Q_i)) \cdot Q_i)$ .

3. Если в данной ветви необходимо получить поток воздуха в диапазоне  $(Q_{\min i}, Q_{\max i})$  и струя воздуха после регулирования не перевернута, то  $fit = fit + (Q_{\min i} - |Q_i|)$  (при  $Q_{\min i} > |Q_i|$ ) или  $fit = fit + (|Q_i| - Q_{\max i})$  (при  $Q_{\max i} < |Q_i|$ ).

Если же струя воздуха в ветви противоположного направления, то  $fit = fit + (Q_{\min i} - (-\text{sign}(Q_i)) \cdot Q_i)$ .

Полученное после обхода всех заданных ветвей значение функции «приспособленности»  $fit$  является оценкой пригодности «хромосомы» для достижения требуемых потоков воздуха.

Второму критерию оптимизации (минимуму полезной мощности, затрачиваемой на проветривание) соответствует следующая формула расчета значения функции «приспособленности». Для всех ветвей рассчитывается сумма:

$$fit_{\text{power}} = \sum_i (R_{\text{кв}i} Q_i^2 + R_{\text{лин}i} |Q_i| + |c_i - h_{\text{ети}}| \cdot |Q_i|),$$

где  $R_{\text{кв}i}$  — квадратичная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8$ ,  $R_{\text{лин}i}$  — линейная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^5$ ;  $Q_i$  — расход воздуха в  $i$ -й ветви,  $\text{м}^3 / \text{с}$ ;  $c_i$  — депрессия вентилятора в  $i$ -й ветви, Па;  $h_{\text{ети}}$  — депрессия естественной тяги, Па.

Такой расчет мощности учитывает наличие зон обрушения и действующую естественную тягу, как и депрессию установленных в сети вентиляторов. В качестве значения функции «приспособленности» принимается рассчитанная мощность, переведенная в киловатты.

Наконец, по третьему критерию оптимизации (взвешенному) значение функции «приспособленности хромосомы» определяется как сумма

$$fit_v = \text{coef}_{\text{reg}} \cdot fit + \text{coef}_{\text{power}} \cdot fit_{\text{power}},$$

где  $coef_{reg}$  — коэффициент, учитывающий долю суммарной невязки заданных потоков (вес первого критерия),  $coef_{power}$  — коэффициент, учитывающий долю полезной мощности (вес второго критерия). Коэффициенты задаются пользователем.

До запуска генетического алгоритма требуется задать значения ряда параметров, в числе которых количество «хромосом» в одном «поколении», разрядность «генов», вероятности «скрещивания» и «мутации», возможность использования стратегии элитизма, предельное количество «поколений» с неизменным лучшим значением функции «приспособленности», после которого алгоритм останавливается. Помимо этого задаются общие интервалы для сопротивления и депрессии, коэффициенты взвешенной функции «приспособленности», определяется один из трех критериев 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 две «хромосомы», из них выбирается одна с лучшим значением «приспособленности» [109].

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». По результатам работы алгоритма выводятся параметры регуляторов для лучшей «хромосомы» последнего «поколения». В результате расчета распределения воздуха с данными параметрами регуляторов можно получить список невязок по всем заданным ветвям, полезную мощность и суммарную невязку.

В том случае, если результаты устраивают пользователя, их можно сразу сохранить в базе данных, вернуться в редактор топологии и проверить все скорости потоков в ветвях. Если же результаты не устраивают пользователя, необходимо корректировать параметры алгоритма, в первую очередь границы интервалов по сопротивлению и депрессии. Если в процессе оптимизации параметров регулируемых ветвей для выбранного варианта становится очевидно, что в практически реализуемых пределах значения параметров регуляторов не подобрать, нужно вернуться к списку вариантов регулирования и выбрать для анализа другой из них.

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.

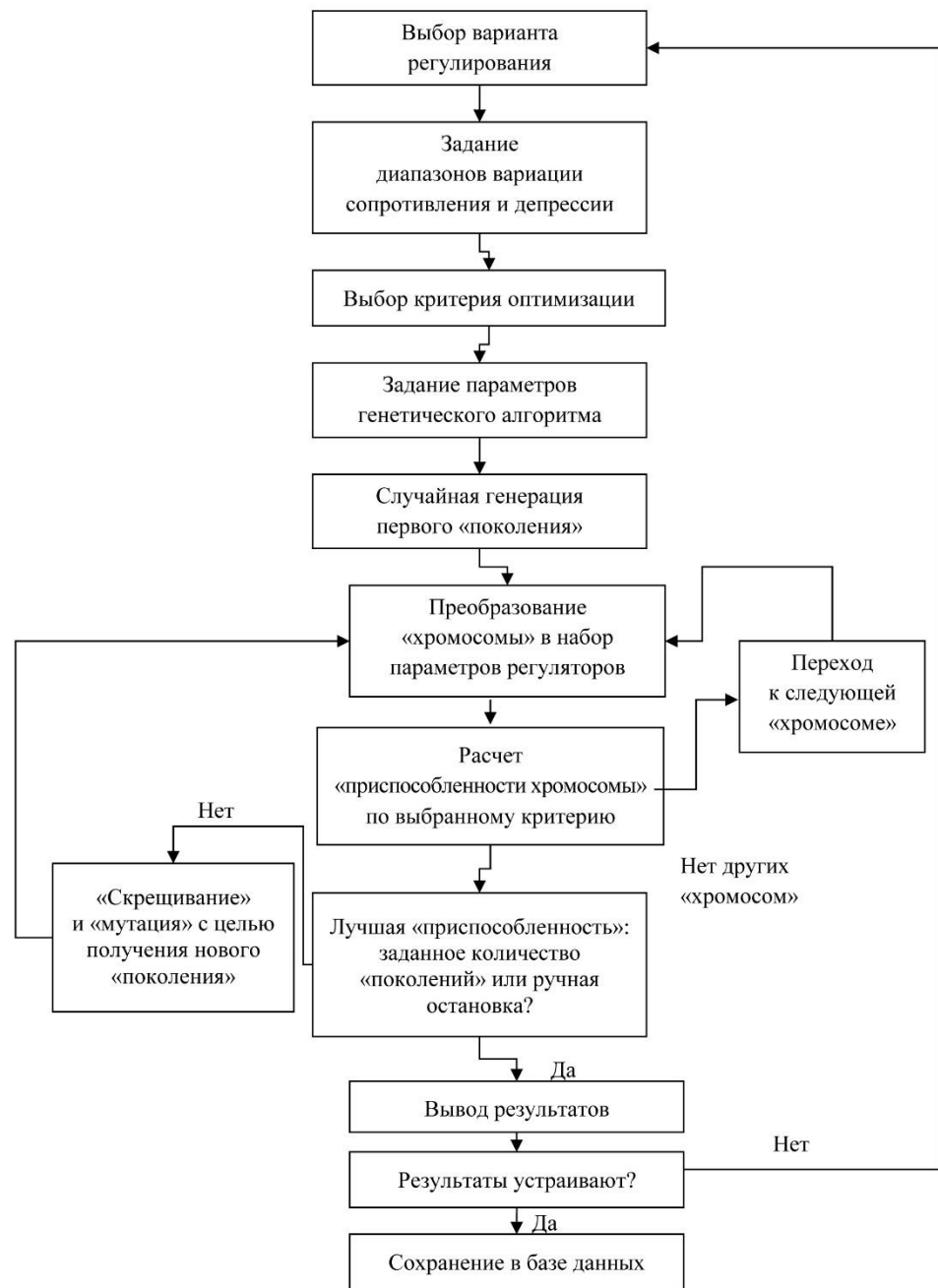


Рис. 1.3. Блок-схема алгоритма оптимизации параметров регуляторов для выбранного варианта

Таким образом, оценку оптимальности конкретного варианта регулирования вентиляционной сети следует производить уже после того, как определены типы перемычек и вентиляторов, скорректированы значения депрессий вентиляторов и сопротивления перемычек и произведен окончательный расчет распределения воздуха в вентиляционной сети.

Основным критерием оптимальности регулирования вентиляционной сети является невязка потоков воздуха по заданным ветвям, алгоритм расчета которой подробно описан ранее. Фактический выбор варианта регулирования должен производиться так, чтобы оставшаяся невязка по ветвям с заданными потоками была минимальной. Если таких вариантов нет, необходимо скорректировать множество регулируемых ветвей, изменить диапазон вариации регулировочных параметров или же внести изменения в топологию сети (рис. 1.3).

Из множества вариантов, удовлетворяющих первому критерию, дальнейший выбор может производиться по величине затрачиваемой на проветривание мощности, но, как правило, варианты с наименьшим количеством регуляторов требуют большей мощности (например, требуется установка всего трех вспомогательных вентиляторов, зато большой мощности). Поэтому окончательный выбор варианта может быть произведен только специалистом. Безусловно, оказать влияние на выбор может также отсутствие практической возможности реализовать данное расположение регуляторов с учетом их типов. Важно учесть при выборе варианта с уже установленными в системе вентиляторами, что изменение режима работы одного из них должно производиться совместно с регулированием режимом других вентиляторов [110, 111].

Дальнейшая оценка гигиенической эффективности и надежности проветривания, как и уровня риска принятия решений по регулированию сети с помощью выбранного варианта, может быть осуществлена по известным методикам [112–114].

### ***1.2.3. Совершенствование метода расчета воздухораспределения***

Расчет распределения воздуха в сети относится к основным задачам, возникающим при проектировании вентиляционной системы. Постановка задачи кратко заключается в следующем: требуется получить решение с нужной точностью за приемлемое количество итераций для сети любой топологии с заданными аэродинамическими сопротивлениями ветвей, депрессиями вентиляторов, рассчитанной по принятой методике естественной тягой и заданным расходом воздуха, поступающего в систему от вентиляторов главного проветривания [115–117].

Достоверное решение задачи расчета распределения воздуха в системе требуется для регулирования потоков воздуха. В некоторых источниках методы решения такой задачи условно называются расчетом «естественного» распределения воздуха. В строгой постановке «естественным» можно назвать только распределение воздуха в системе выработок под действием естественной тяги. Поскольку в приведенной выше постановке идет речь о задании расходов воздуха для вентиляторов главного проветривания, то эту задачу корректнее относить к частному случаю регулирования распределения воздуха в системе для обеспечения заданных потоков [118].

Логично и в решении данной задачи воплощать основные принципы, разработанные для решения задачи регулирования с помощью местных перемычек и вентиляторов. Важность задачи расчета распределения воздуха в системе обусловлена тем, что при таком расчете учитываются местные

регулирующие устройства. Поэтому в данной работе как таковой задачи расчета «естественного» распределения воздуха не ставится, так как и последующая задача регулирования на базе «естественного» воздухораспределения не ставится.

Итак, «естественное» воздухораспределение — это задача распределения без строго заданных потоков внутри системы, кроме общего потока (на входе). Она, по своей сути, представляет собой частный случай задачи распределения с заданными потоками.

Решение такой задачи было представлено в соответствующем модуле системы автоматизированного проектирования вентиляционных систем (САПР ВС), разработанной в Горном институте КНЦ РАН с первых версий, однако анализ алгоритма выявил ряд проблем, связанных как с несовершенством реализации известных численных методов [119–121], так и с ограничениями программных инструментов, использованных для разработки предыдущих версий САПР. Работа по такой программе с вентиляционными сетями повышенной сложности, например для сети Расвумчоррского рудника, не позволяла провести расчет воздухораспределения до конечного результата. Проблемы расчета возникали уже на стадии построения дерева графа, что явилось первопричиной, побудившей прежде начать модернизацию основного алгоритма [122], а затем и принципиально переработать его.

Анализ вариантов размещения регуляторов и генетический алгоритм поиска оптимальных параметров регуляторов связаны с многократным расчетом распределения воздуха в руднике. Поэтому метод расчета должен позволять достаточно надежно и быстро определять потоки воздуха в ветвях сети с учетом естественной тяги, утечек воздуха, аэродинамических характеристик вентиляторов. Проведенный анализ существующих методов расчета показал, что задача разработки такого метода остается актуальной.

Вопросы формирования системы уравнений в соответствии с первым и вторым законом сетей и ее эффективного решения непосредственно связаны с разработкой эффективного алгоритма регулирования вентиляционной сети. При глубоком изучении вопроса оказалось, что в методике [122, 123] получения системы уравнений по минимальному дереву графа и самом алгоритме решения системы уравнений заложены серьезные ошибки:

- неправильно реализована логика при построении дерева графа, что приводило к ошибкам для сложных задач;
- неверный знак при расчете  $R_{\text{лин}}Q$  (для линейного сопротивления в ветвях с обрушением при обходе контура против направления потока воздуха), что приводило к ошибочному расчету сетей с обрушением;
- алгоритм построения минимального дерева графа нельзя использовать в общем случае, так как возникает неоднозначность при выборе дерева с минимальным количеством ветвей и, следовательно, система уравнений формируется неоптимально;
- наконец, процесс решения системы уравнений чрезвычайно медленно сходиллся, например, для достижения приемлемого результата в вентиляционной сети Расвумчоррского рудника (даже после устранения явных ошибок) понадобилось более 1800 итераций.

При такой медленной сходимости отпадает возможность оптимизации размещения регуляторов, так как необходимо многократно пересчитывать систему. Видимо, именно по этой причине в старом алгоритме возникло ограничение

50-ю итерациями, чтобы уменьшить время расчета, что в итоге при расчете сложных сетей приводило к неверному результату. В целом можно отметить, что при расчете простых сетей сложностей не возникало и при таком подходе.

Редактирование топологии протяженной сети накладывает требования на графический редактор топологии, и при его отсутствии в программе (как в первых версиях САПР) или наличии упрощенной двумерной версии редактора без возможностей масштабирования (как в предыдущей версии программы) сложную сеть практически невозможно ввести в программу. Естественно, после разработки трехмерного редактора топологической схемы появилась возможность адекватного представления вентиляционной сети с множеством ветвей на разных горизонтах, что, в свою очередь, сделало актуальной задачу модернизации методики и алгоритма расчета протяженной сети с множеством диагональных соединений.

В усовершенствованном алгоритме исправлены явные, фактические ошибки расчета. Само построение расчета также выполнено на других принципах [124], основные из которых перечислены далее.

Метод построения дерева графа в новом алгоритме — стандартная приоритетная очередь, реализованная на основе так называемых «красно-черных деревьев» — указателей. «Красно-черные деревья» — эффективная структура данных, поддерживающая операции вставки, поиска и удаления. Дерево графа построено по минимуму  $R_{\text{кв}}$  с приоритетом  $R_{\text{кв}} = 0$ . Это означает, что дерево графа минимально по сопротивлению.

Как ранее здесь указывалось, в предыдущем алгоритме минимизация дерева графа осуществлялась по принципу минимального количества ветвей. Это приводило к неоднозначности дерева, так как появлялось много деревьев с одинаково минимальным количеством ветвей. Какое именно дерево будет построено в каждом конкретном случае — предсказать было трудно.

В новом алгоритме при построении дерева графа 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, минимальны. Это позволило принципиально улучшить сходимость процесса, так как для контура быстро находится максимальная поправка, а дальше идет тонкая «доводка» результата.

На основе дерева графа, оптимизированного по минимуму сопротивления, строится система нелинейных (квадратных) уравнений (по ветвям-связям) в соответствии со вторым законом сетей.

В предыдущей версии алгоритма на основе системы «узловых» линейных уравнений получали начальное приближение для решения нелинейной системы [122]. В новом алгоритме все по-другому: система линейных уравнений формируется и решается стандартным методом Гаусса, при этом первое приближение в новом и старом алгоритмах не совпадают.

Система нелинейных уравнений решается методом последовательных приближений. При этом в предыдущей версии алгоритма методом Андрияшева поправка для каждого контура находилась весьма приближенно. Поэтому после обхода всех контуров фактически все начиналось сначала, так как контурная поправка оказывалась далека от истинной. Для сложной вентиляционной сети

найти решение с приемлемой точностью (хотя бы  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ) было большой проблемой. В некоторых случаях поправка получалась слишком «большой» для достоверного результата и отбрасывала решение «назад».

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. В «старом» алгоритме, 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 итераций для достижения точности поправки  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  в самых сложных случаях не превышает 11 для контурного уравнения. Таким образом, в новом алгоритме задана точность определения поправки ( $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и после ее нахождения уточняется решение для расходов воздуха  $Q$ . Далее осуществляется переход к следующему контуру.

В предыдущей версии алгоритма точность определения потоков воздуха никак не контролировалась. Решение считалось достигнутым, если все нелинейные уравнения выполнялись с точностью  $0,5 \text{ Па}$ . Это, конечно, гарантия высокой точности определения  $Q$ , но только тогда, когда нет жесткого ограничения количества итераций. А в старой версии их было задано всего 50. Для сложных случаев этого явно не хватало, а решение фактически не было достигнуто. Но даже при увеличении числа итераций алгоритм повторял их до достижения выполнимости уравнений с той самой заданной точностью. При этом количество воздуха в ветвях уже практически не изменялось. Очевидно, что увеличение числа итераций не приводило к получению конечного результата, хотя формально наблюдалось количество воздуха с точностью  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  и депрессия с точностью  $0,5 \text{ Па}$ .

В новом алгоритме за окончание решения выбрана точность определения потоков воздуха, а не невязка по контурным уравнениям. Количество итераций при этом «вторично». Задано предельное число итераций, но такое, чтобы итерационный процесс достижения точности не прерывался «искусственно» — из-за ограничения числа итераций. В новом алгоритме точность определения  $Q$  задана  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ , а выполнимость уравнений «вторична» (до  $0,5 \text{ Па}$ ). Общее предельное число итераций — 1000, а для контурного уравнения — 50.

Таким образом, при новом алгоритме решение с точностью по  $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  сходится на порядок (иногда даже на два порядка) быстрее, чем в «старом». Например, для Расвумчоррского рудника (500 ветвей) достаточно 35 итераций вместо 400–500 (а иногда и более 1000 — из-за неопределенности построения дерева графа в предыдущей версии алгоритма). Время счета составляет  $0,016 \text{ с}$  в сравнении с несколькими секундами по предыдущему методу. Несмотря на кажущуюся несущественность временных затрат на решение задачи, разница является принципиальной при многократном прогоне алгоритма в процессе регулирования расходов воздуха местными перемычками и вентиляторами.

При практической реализации алгоритма в модуле системы автоматизированного проектирования была осуществлена возможность автоматического построения графиков зависимости невязки по контурам

и приращения на ветви от номера общей итерации. При расчете вентиляционной системы рудника Олений Ручей по старому методу были получены графики (рис. 1.4 и 1.5).



Рис. 1.4. График зависимости максимальной невязки депрессии на контуре от номера общей итерации

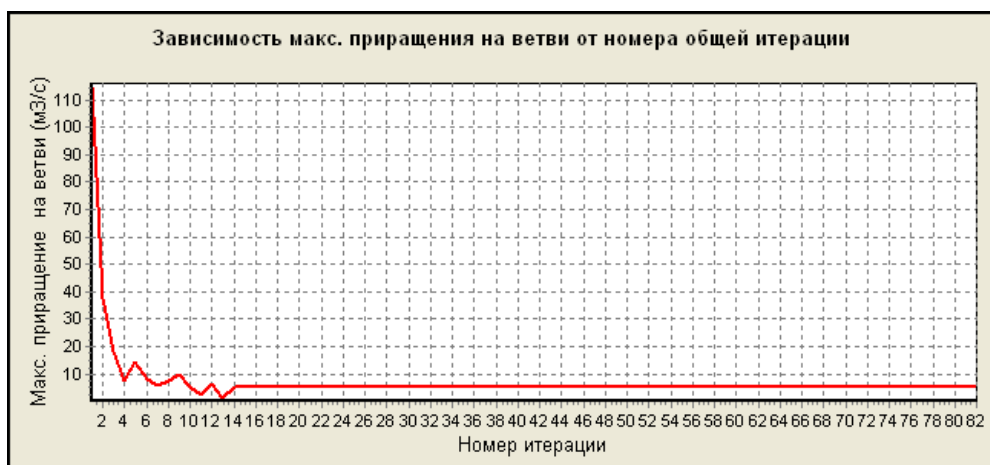


Рис. 1.5. График зависимости максимального приращения на ветви от номера общей итерации

Вентиляционная система состояла из 138 ветвей и 34 контуров. Расчет занял 1,8 с, всего было проведено 82 итерации. На графиках заметно колебание невязки на контуре при достаточно постоянном приращении на ветви после 14-й итерации. Фактически это означает, что конечные значения расходов воздуха и депрессии с приемлемой точностью могли быть получены уже за 14 итераций, в течение которых невязки уменьшались. На рис. 1.6 и 1.7 представлены графики расчета до 14-й итерации.



Рис. 1.6. График зависимости максимальной невязки на контуре от номера общей итерации (до 14-й итерации)



Рис. 1.7. График зависимости максимального приращения на ветви от номера общей итерации (до 14-й итерации)

После усовершенствования метода расчета были получены совсем другие графики, отражающие монотонную сходимость к минимальным значениям за 14 итераций (рис. 1.8 и 1.9). Весь расчет занял 2 мс.

Быстрая монотонная сходимость невязок по контурным и узловым уравнениям позволяет осуществлять расчет вариантов регулирования и параметров регуляторов.

Таким образом, разработанный метод расчета оптимизирует систему уравнений по минимуму аэродинамического сопротивления и решает ее методом последовательных приближений с уточнением поправок на каждом шаге модифицированным методом Ньютона [124].

Теперь представим основные этапы расчета, кратко описанные ранее, более детально.



Рис. 1.8. График зависимости максимальной невязки на контуре от номера общей итерации при расчете по усовершенствованному методу



Рис. 1.9. График зависимости максимального приращения на ветви от номера общей итерации при расчете по усовершенствованному методу

После задания топологии и расчета аэродинамических сопротивлений ветвей (если они не заданы) задается расход воздуха — задание на ВГП. Для корректности расчета воздухораспределения требуется непрерывность нумерации ветвей и узлов. Помимо этого накладываются и определенные ограничения на саму топологию: ветви входа-выхода на поверхность являются отдельными условными ветвями, не представляющими выработки, параметры которых — это параметры ВГП и составляющие естественной тяги. Поверхность представляется нулевым узлом (что не имеет отношения к высотной отметке конкретного устья), и это позволяет замкнуть контуры ветвей с входом-выходом. Основная ветвь входа (с начальным узлом на поверхности) должна иметь максимальный порядковый номер. Важно сначала рассчитать естественную тягу, а затем уже переходить к расчету воздухораспределения, чтобы учесть действие естественной тяги в устьях при расчете.

Ветви вентиляционной сети образуют связный граф. Принимается для каждой ветви условный вес, равный значению квадратичной составляющей аэродинамического сопротивления, и находится минимальное дерево графа. По нему составляется база независимых контуров путем последовательного добавления по одной ветви-связи. На основе независимых контуров составляется система нелинейных уравнений в соответствии со вторым законом сетей. В ветвях-связях, замыкающих контуры, максимальны сопротивления и минимальны потоки воздуха.

Составляется система линейных уравнений по узлам сети и решается стандартным методом Гаусса. Получено начальное приближение распределения потоков воздуха по ветвям.

Могут быть заданы депрессии ВГП или расходы воздуха в ветвях с ВГП, далее рассмотрим расчет для заданных расходов.

Устанавливается первое приближение депрессии ВГП:

$$c_i^{(0)} = (-10)N_v Q_{zi} / \sum_{j=1}^{N_v} Q_{zj},$$

где  $N_v$  — общее количество вентиляторов главного проветривания с заданными расходами воздуха,  $Q_{zi}$  — расход воздуха, заданный для  $i$ -го вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

После того как были определены начальные приближения по депрессии ВГП, решается система нелинейных контурных уравнений методом простых итераций.

Задаются следующие величины невязок:  $\alpha_{\text{конт}} = 0,5 \text{ Па}$  — максимальная невязка депрессии по контурному уравнению,  $\alpha_{\Delta Q} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$  — минимальное значение поправки потока воздуха по ветви внутри цикла,  $\alpha_Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  — минимальное изменение потока воздуха по ветви за одну итерацию. Устанавливается предельное количество итераций: по основному циклу итераций  $N_{it} = 1000$ , по циклу итераций внутри контура  $N_{it2} = 50$ .

Далее осуществляется основной цикл расчета до тех пор, пока не превышено общее количество итераций или не достигнута максимальная невязка по всем контурным уравнениям. В этом цикле последовательно рассчитываются все контурные уравнения, причем для каждого из них реализован вложенный цикл итераций расчета.

Рассмотрим вложенный цикл для контура  $N_{\text{конт}}$ . Находятся суммы:

$$\begin{aligned} \text{sum}|RQ| &= \sum_{i=1}^{N_{\text{конт}}} |R_{\text{кв}i} Q_i|, \\ \text{sum}R_{\text{лин}} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{конт}}} |R_{\text{лин}i}|, \\ \text{sum}K &= \sum_{i=1}^{N_{\text{конт}}} \text{sign}(K) \cdot \text{sign}(q_i) \cdot R_{\text{кв}i} Q_i^2 + R_{\text{лин}i} Q_i + c_i, \end{aligned}$$

где  $R_{\text{кв}i}$  — квадратичная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ;  $R_{\text{лин}i}$  — линейная составляющая аэродинамического сопротивления  $i$ -й ветви,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^5$ ;  $c_i$  — депрессия вентилятора в  $i$ -й ветви с учетом естественной тяги,  $\text{Па}$ ;  $q_i$  — расход воздуха в  $i$ -й ветви,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\text{sign}(q_i)$  — знак расхода воздуха в  $i$ -й ветви с учетом направления обхода контура  $\text{sign}(K)$ ,  $N_{\text{конт}}$  — количество ветвей в контуре.

Определяется поправка потока воздуха по ветви внутри цикла:

$$\Delta q = -\text{sum}K / (2 \cdot \text{sum}|RQ| + \text{sum}R_{\text{лин}}) .$$

Если поправка превышает заданное минимальное значение  $\alpha_{\Delta Q} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ , то все потоки воздуха для ветвей заданного контура модифицируются:

$$q_i^{(k+1)} = q_i^{(k)} + \text{sign}(K) \cdot \Delta q .$$

После того как вложенный цикл итераций пройден для каждого контурного уравнения, по всем контурам рассчитываются невязки:

$$\text{Err}K = |\text{sum}K| = \left| \sum_{i=1}^{N_{\text{конт}}} \text{sign}(K) \cdot \text{sign}(Q_i) \cdot R_{\text{кв}_i} Q_i^2 + R_{\text{лин}_i} Q_i + c_i \right| .$$

Если хотя бы для одного контура рассчитанная невязка превысила заданное максимальное значение  $\alpha_{\text{конт}} = 0,5 \text{ Па}$ , то осуществляется переход на следующую итерацию основного цикла.

Также рассчитываются итоговые поправки всех расходов воздуха, и, если хотя бы для одной ветви приращение превысило заданное минимальное значение  $\alpha_Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ , расчет продолжается для новой итерации. Конечно, для основного и вложенного цикла расчета проверяется количество итераций.

При наличии ветвей с заданными расходами воздуха по ВГП после осуществления расчета с депрессиями ВГП по первому приближению будет достаточно большая невязка расходов воздуха. Поэтому необходима дальнейшая коррекция потоков, которая осуществляется на основе применения подхода, основанного на анализе взаимосвязи параметров ветвей системы.

В общем цикле приближения к заданным расходам воздуха по ВГП сначала проверяются невязки расходов, и в том случае, если хотя бы по одной ветви с заданным расходом невязка превышает  $\varepsilon_{zq} = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , осуществляется расчет матриц взаимосвязи параметров для данной итерации.

Для первой итерации депрессия всех ВГП рассчитывается по формуле

$$c_i^{(1)} = c_i^{(0)} + \text{sign}(Q_{zi}) \cdot \text{sign}(Q_{zi} - Q_i^{(0)}) \cdot c_i^{(0)} / 2 ,$$

где  $c_i^{(0)}$  — начальное значение депрессии  $i$ -го ВГП, Па;  $Q_i^{(0)}$  — расход воздуха в ветви с  $i$ -м ВГП при начальном значении депрессии,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{zi}$  — заданный расход воздуха в ветви с  $i$ -м ВГП,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\text{sign}(Q_{zi})$  — знак расхода воздуха.

Осуществляется расчет потоков воздуха методом простых итераций для нового значения депрессии одного  $i$ -го ВГП, после чего определяются значения коэффициентов взаимосвязи потоков воздуха в  $i$ -й ветви и во всех остальных ветвях с ВГП:

$$k\text{Kor}[i, j] = (Q_j^{(1)} - Q_j^{(0)}) / (Q_i^{(1)} - Q_i^{(0)}) .$$

Определяется также величина относительного приращения депрессии  $i$ -го ВГП:

$$dH_i = (c_i^{(1)} - c_i^{(0)}) / (Q_i^{(1)} - Q_i^{(0)}).$$

Модификация депрессии осуществляется последовательно для всех ВГП, и определяются матрица коэффициентов взаимосвязи параметров сети и вектор относительных приращений депрессии.

Составляется система линейных уравнений следующего вида:

$$k\text{Kor}[i, j] \cdot x_i = Q_{zj} - Q_j^{(0)}, \quad i, j = \overline{1, N_{\text{ВГП}}}.$$

Система решается стандартным методом Гаусса с точностью 0,01 м<sup>3</sup>/с. Так находятся значения  $dQ_i = x_i$  и новые значения депрессии всех ВГП:

$$c_i^{(1)} = c_i^{(0)} + dH_i \cdot dQ_i.$$

Осуществляется расчет распределения воздуха в соответствии со вторым законом сетей методом простых итераций с новыми значениями депрессий вентиляторов. Блок-схема алгоритма расчета системы нелинейных контурных уравнений методом простых итераций представлена на рис. 1.10.

Пока не превышено предельное количество итераций или не будут получены нужные невязки по расходам воздуха в ветвях с ВГП, расчет продолжится для новой итерации. Причем вариация депрессии каждого ВГП для расчета коэффициентов взаимосвязи для последующих итераций будет осуществляться по формуле, учитывающей относительное приращение депрессии, рассчитанное на предыдущей итерации:

$$c_i^{(k+1)} = c_i^{(k)} + dH_i \cdot (Q_{zi} - Q_i^{(k)}).$$

Весь алгоритм расчета представлен для наглядности в виде блок-схемы (рис. 1.11).

#### **1.2.4. Выводы по главе 1.2**

1. Разработанный алгоритм анализа взаимосвязи параметров вентиляционной сети позволяет определить наиболее эффективные варианты расположения регуляторов в системе.

2. Приложение генетического алгоритма к решению задачи регулирования распределения воздуха в вентиляционной системе помогает разрешить проблему перебора большого количества возможных значений параметров регуляторов с учетом нескольких критериев оптимальности.

3. Метод, в основу которого положен итерационный процесс применения анализа взаимосвязи параметров сети и генетического алгоритма с оценкой результатов и возможной коррекцией заданных параметров на каждом этапе пользователем, способствует гибкому регулированию распределения воздуха в сети.

4. Усовершенствованный алгоритм расчета распределения воздуха в вентиляционной сети рудника с регуляторами дает возможность получить достоверные значения расходов воздуха и депрессий в ветвях сети с требуемой точностью за малое количество итераций.

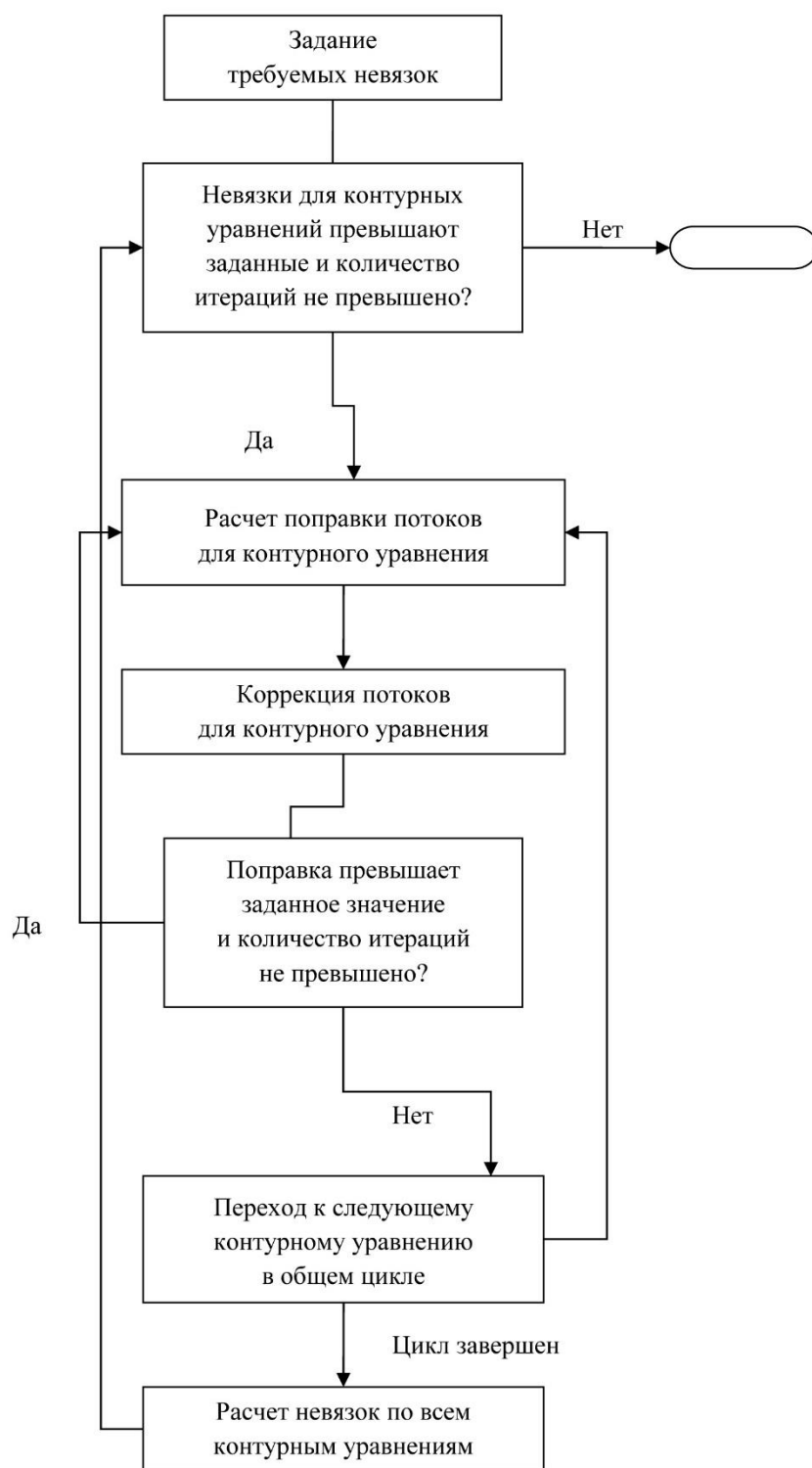


Рис. 1.10. Блок-схема алгоритма решения системы нелинейных уравнений методом простых итераций

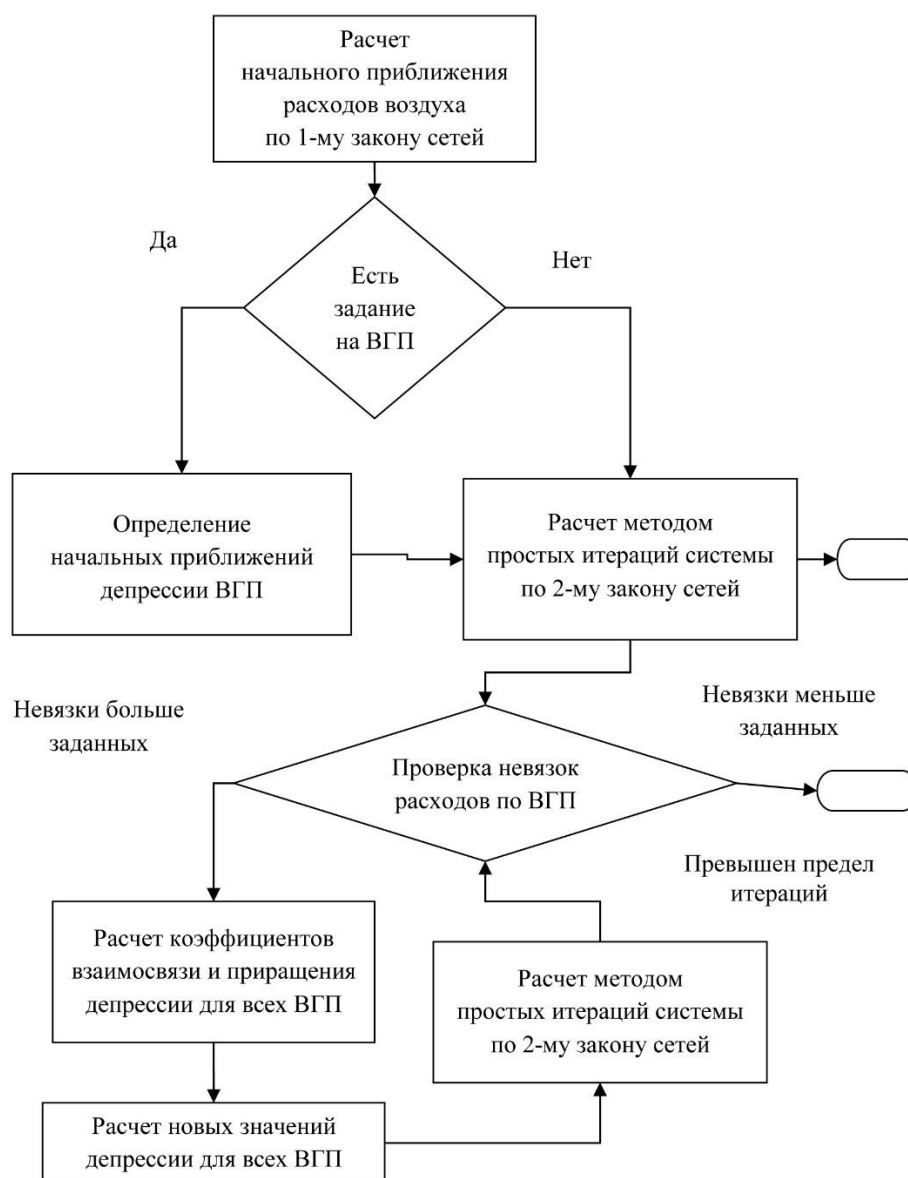


Рис. 1.11. Обобщенная блок-схема расчета распределения воздуха

### 1.3. Особенности реализации метода оптимизации регуляторов вентиляции рудника в системе автоматизированного проектирования

#### 1.3.1. Трехмерное моделирование вентиляционной сети в системе автоматизированного проектирования вентиляции

В ходе предыдущих исследований был разработан комплекс программ, предназначенный для автоматизации проектирования вентиляционных систем подземных рудников, кратко названный САПР ВС [119, 123]. Практическая

реализация изложенного метода осуществлялась путем модификации имеющихся модулей автоматизированной системы и разработки новых модулей [124]. Расчет вентиляции рудника осуществляется только на основе топологической схемы рудника, в которой учтены все основные пути движения воздушных потоков и установленные регуляторы воздухораспределения.

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 [125].

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 определения орографической, высотно-температурной и ветровой составляющих тяги;
- модуль расчета воздухораспределения в ВС рудника с учетом зон обрушения, естественной тяги, вентиляторов главного проветривания 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 оценки эффективности проветривания с установленными регуляторами;
- модуль предпроектных расчетов ВС рудника, позволяющих проводить достаточно детальную оценку и выбор основных параметров ВС уже на стадии технико-экономических обоснований (ТЭО).

Кратко опишем основные отличия новой версии САПР от предыдущей.

Реализованный в старой версии программы метод оптимизации расположения и параметров регуляторов распределения воздуха в сети предоставлял возможность определения параметров регуляторов при условии их установки в ветвях с заданными расходами, по сути, никак не обеспечивая решение задачи выбора мест установки и типа регулирования. Поскольку для анализа вариантов регулирования требовался надежный метод расчета распределения воздуха в сети, был модернизирован соответствующий модуль расчета. Модуль выбора вентиляторов также был усовершенствован в связи с изменением структуры базы данных с характеристиками вентиляторов и переходом к иному принципу описания графической характеристики вентилятора. Также был добавлен модуль оценки эффективности проветривания системы с помощью предложенных регуляторов. Основным же отличием интерфейса новой версии программного продукта от предыдущей стал

трехмерный редактор топологической схемы, который и будет несколько детальнее рассмотрен далее.

Проблемы двухмерного редактора: отсутствие наглядности схемы, невозможность масштабирования и организации относительно простого ввода информации из файлов, созданных в других системах проектирования, особенно в Автокаде (AutoCAD); морально устаревший интерфейс.

Для обеспечения возможности ввода большой топологической схемы и удобной последующей работы с ней потребовалось разработать принципиально новый редактор топологии и обеспечить его совместимость с остальными модулями.

Заметим, что во многих программах моделирования вентиляции рудников сторонних производителей заложены функциональные возможности экспорта созданных в них топологических схем в распространенные форматы файлов Автокада — dwg и dxf. Реализация импорта схем из таких файлов позволила бы значительно упростить процесс ввода данных в САПР ВС. Однако задача импорта схемы из файла, созданного в других САПР, потребовала прежде всего расширения состава объектов, используемых при моделировании топологии. Наиболее простым решением было произвести модернизацию всего модуля редактирования топологии и использовать в дальнейшей разработке более высокоуровневые библиотеки.

Была выбрана библиотека Векад (Vecad), позволяющая создать интерфейс пользователя, максимально приближенный к программе Автокад, и упростить процесс импорта графических файлов, созданных с помощью этой программы. Реализована библиотека как динамически подключаемая, что позволяет использовать ее при создании приложений в среде программирования и не затрудняет распространения программ, использующих ее в специализированных геоинформационных системах или системах автоматизированного проектирования. Графическая библиотека Векад ориентирована на автоматизацию выполнения основных задач, возникающих при разработке трехмерной сцены, и создание интерфейса программы, максимально схожего с интерфейсом системы Автокад.

Моделирование вентиляционной сети в трехмерной системе координат основано на использовании векторных примитивов — линий. Отказ при разработке редактора от собственно трехмерных объектов (сфер, цилиндров) связан в первую очередь с достаточно высокой степенью условности при моделировании системы подземных выработок для целей расчета параметров вентиляции. Так, проектирование вентиляционных схем зачастую требует введения параллельных ветвей между двумя узлами для упрощения расчета, но их невозможно отобразить с помощью описанных трехмерных объектов, использованных в предыдущей версии программы. Эта проблема легко решается при оперировании плоскими объектами, располагаемыми в трехмерном декартовом координатном пространстве. В свою очередь, использование векторных примитивов упрощает печать схемы, так как позволяет отображать регуляторы, направление потоков воздуха, номера узлов и ветвей, подписи с расходами воздуха в привычном для проектировщика виде.

Модель вентиляционной сети в редакторе представляет собой трехмерный оргграф сети, дополненный условными обозначениями регулирующих устройств (ВГП, вспомогательных вентиляторов и вентиляционных сооружений). 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 Автокада. Кроме того, в табличном отформатированном виде отчет о топологии сети можно сохранить в формате Excel.

Помимо инструментов поддержки ввода топологической информации, в редакторе есть 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. В данной версии программного модуля реализована возможность расчета квадратичного сопротивления по коэффициенту аэродинамического сопротивления, часто указываемому в источниках как альтернатива оценке сопротивления по типу крепления и расположения [126–128].

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.

Задание всех параметров отдельной ветви производится на вкладках, что увеличивает площадь просмотра схемы. В редакторе существует возможность распределения объектов по слоям, что позволяет выделить объекты, относящиеся к разным горизонтам, в разные группы и в зависимости от необходимого участка редактирования схемы сделать невидимыми объекты других горизонтов, уменьшив число графических показываемых элементов. Инструменты выбора нужного двух- и трехмерного вида просмотра схемы, интерактивного масштабирования и перемещения показываемого участка схемы позволяют упростить редактирование, настроить печать и сохранять копии экрана с необходимым графическим изображением.

При выборе ветви на схеме на вкладках сразу отображаются все данные, связанные с ней, в том числе расход воздуха, сопротивление и депрессия, что позволяет сразу перейти к их редактированию. Новым в данной версии редактора также является инструмент навигации, который помогает пользователю программы быстро переходить от одной области большой схемы к другой, и инструмент автоматического увеличения («лупа»), который позволяет увидеть в отдельном окне увеличенный участок схемы. Реализация данных инструментов позволяет просматривать всю схему в одном окне и связанный с ней укрупненный участок с читаемыми подписями в связанном окне.

Так как при подготовке необходимой 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. Все графические элементы схемы можно форматировать с помощью стандартных панелей форматирования цвета, толщины и типа линий, как по отдельности, так и группой выделенных объектов. Выделение производится с помощью ряда инструментов — выделение по слою, по рамке, по указателю. С инструментами этой группы

связаны инструменты поиска — по номеру элемента, текстовой подписи. Реализация таких инструментов позволяет упростить редактирование конкретных элементов вентиляционной схемы.

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.

Ценными являются также инструменты автоматизированного поиска ветвей сети со скоростями воздуха, превышающими или оказавшимися меньше значений, указываемых пользователем. Выделенные ветви окрашиваются на схеме в другой цвет.

В целом можно считать, что модернизация редактора топологии САПР ВС позволила значительно упростить процесс ввода данных, расширила функциональные возможности программы и улучшила интерфейс пользователя.

### ***1.3.2. Расчет воздухораспределения***

Поскольку теоретические основы метода расчета и описание алгоритма были представлены в главе 1.2, здесь остановимся на особенностях практической реализации соответствующего модуля САПР ВС и результатах тестирования.

Алгоритм расчета воздухораспределения в сети используется и в модуле регулирования, однако первоначально в состав САПР ВС был включен отдельный модуль, предназначенный только для решения задачи распределения потоков, заданных для вентиляторов главного проветривания. В рамках данной работы был усовершенствован метод расчета с целью улучшения его надежности и быстродействия. Подробно все аспекты усовершенствованного метода были представлены ранее. Интерфейс модуля остался без особых изменений, однако для целей тестирования была разработана форма отчета, в которой в текстовом виде выводилась информация об общем количестве итераций при расчете сети разработанным методом, максимальном количестве вложенных итераций для отдельного контура и максимальной невязке по контуру, максимальном приращении расхода воздуха по ветви на каждой итерации общего цикла. Также была реализована возможность автоматизированного построения графиков с перечисленными данными в зависимости от номера итерации для конкретного расчета методом.

Все тесты были произведены на компьютере с установленной операционной системой Microsoft XP SP2, процессором Intel Pentium Dual CPU E2160 1.8 ГГц операционной памятью 1 Гб.

Опишем тестирование, осуществленное для простой сети упрощенной топологии — с одним горизонтом, одним стволом, по которому поступает свежий воздух на откаточные выработки от ВГП, и двумя стволами, по которым воздух выводится на поверхность.

Топологическая модель, созданная для вентиляционной сети, представлена на рис. 1.12. Для ветвей сети были рассчитаны аэродинамические параметры по введенным длинам, площадям сечений, периметрам выработок и табличным аэродинамическим коэффициентам. Стрелками на схеме указано распределение потоков, его расчет описан далее.

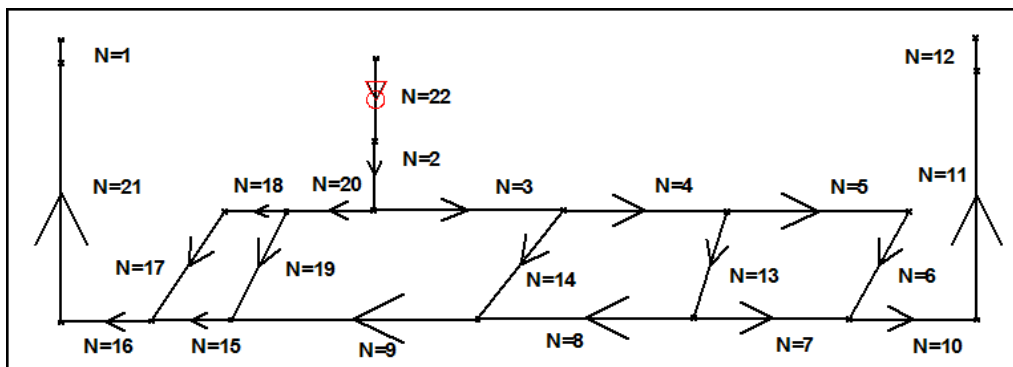


Рис. 1.12. Топологическая схема ВС упрощенной топологии с пронумерованными ветвями

Для условных ветвей, связанных с поверхностью, указано нулевое сопротивление и ветвь входа с ВГП имеет последний порядковый номер. Введенные данные представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры ветвей упрощенной сети

| Начальный узел | Конечный узел | Номер ветви | Сечение, м <sup>2</sup> | Длина, м | Периметр, м | Коэффициент сопротивления, 9,8 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> | Сопротивление, 9,8 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup> |
|----------------|---------------|-------------|-------------------------|----------|-------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1              | 2             | 3           | 4                       | 5        | 6           | 7                                                               | 8                                                   |
| 16             | 0             | 1           | 0,0                     | 0,0      | 0,0         | 0,00000                                                         | 0,00000                                             |
| 2              | 3             | 2           | 50,0                    | 215,0    | 25,0        | 0,00200                                                         | 0,00009                                             |
| 3              | 1             | 3           | 25,0                    | 300,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00028                                             |
| 1              | 4             | 4           | 25,0                    | 200,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00018                                             |
| 4              | 5             | 5           | 25,0                    | 200,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00018                                             |
| 5              | 6             | 6           | 25,0                    | 160,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00015                                             |
| 6              | 7             | 7           | 25,0                    | 200,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00018                                             |
| 7              | 8             | 8           | 25,0                    | 200,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00018                                             |
| 8              | 9             | 9           | 25,0                    | 600,0    | 18,0        | 0,00080                                                         | 0,00055                                             |

| 1  | 2  | 3  | 4    | 5     | 6    | 7       | 8       |
|----|----|----|------|-------|------|---------|---------|
| 6  | 10 | 10 | 25,0 | 200,0 | 19,0 | 0,00080 | 0,00019 |
| 10 | 11 | 11 | 25,0 | 215,0 | 19,0 | 0,00200 | 0,00052 |
| 11 | 0  | 12 | 0,0  | 0,0   | 0,0  | 0,00000 | 0,00000 |
| 4  | 7  | 13 | 21,0 | 160,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00025 |
| 1  | 8  | 14 | 21,0 | 160,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00025 |
| 9  | 12 | 15 | 25,0 | 200,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00018 |
| 12 | 13 | 16 | 25,0 | 200,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00018 |
| 12 | 14 | 17 | 25,0 | 160,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00015 |
| 14 | 15 | 18 | 25,0 | 200,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00018 |
| 15 | 9  | 19 | 14,0 | 160,0 | 14,0 | 0,00080 | 0,00065 |
| 3  | 15 | 20 | 21,0 | 300,0 | 18,0 | 0,00080 | 0,00047 |
| 13 | 16 | 21 | 25,0 | 215,0 | 19,0 | 0,00020 | 0,00005 |
| 0  | 2  | 22 | 50,0 | 0,000 | 0,0  | 0,00000 | 0,00000 |

Расчет действующей естественной тяги не производился, было рассчитано распределение воздуха в системе. Интерфейс модуля расчета достаточно прост, так как требуется только обеспечить пользователю возможность задать поток воздуха во входных ветвях. В данном примере задан поток  $Q_{22} = 150 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В данном примере для приближения к заданному потоку понадобилось всего два расчета методом простых итераций, для первого из которых построены соответствующие графики (рис. 1.13–1.15). На графиках приведена информация для первого расчета методом простых итераций о зависимости: 1) максимальной невязки на контуре от номера общей итерации; 2) максимального приращения потока воздуха на ветви контура от номера общей итерации; 3) максимального количества итераций на контуре от номера общей итерации.



Рис. 1.13. График зависимости максимальной невязки депрессии на контуре от номера итерации



Рис. 1.14. График зависимости максимальной невязки на ветви от номера итерации



Рис. 1.15. График зависимости максимального количества вложенных итераций от номера общей итерации

Графики могут быть построены и для последующих расчетов методом простых итераций для приближения потоков воздуха к заданным на входе. На них заметно снижение как невязок, так и максимального количества итераций при расчете по контурным уравнениям. Последний расчет методом простых итераций фактически послужил проверкой того, что невязки меньше заданных значений.

Поскольку оставшиеся невязки по контурам и узлам сети намного меньше установленных предельных значений (максимальная невязка на контуре равна 0,04 Па, а невязка по потоку воздуха на ВГП — 0,009 м³/с), расчет распределения заданного на ВГП потока воздуха по сети произведен успешно. Весь процесс расчета по времени занял для небольшого примера меньше 1 мс, что позволяет успешно использовать метод для многократного расчета распределения воздуха в сети при оптимизации системы регуляторов. Результаты расчета представлены на рис. 1.16.

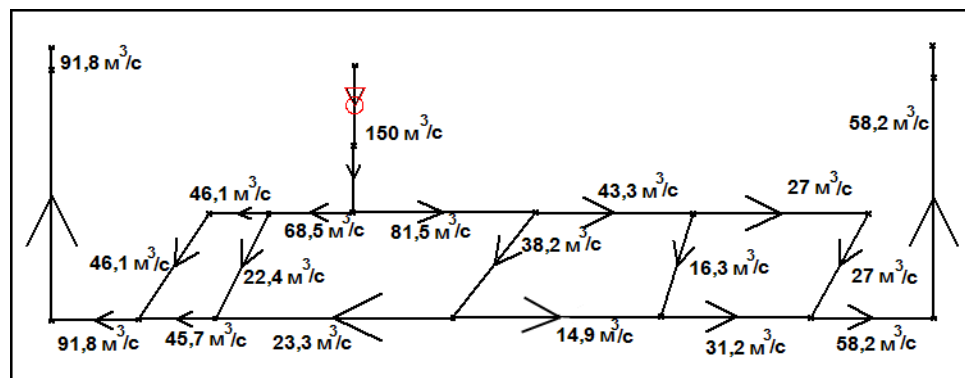


Рис. 1.16. Результаты расчета распределения потоков воздуха

Примеры расчета воздухораспределения для более сложных сетей приведены в главе 1.4, посвященной тестированию САПР ВС на вентиляционных системах реальных проектируемых рудников, и в главе 1.2 при описании отличий метода от предыдущей версии. В табл. 1.2 представлены результаты тестирования метода расчета сетей на различных вентиляционных сетях.

Представленные результаты относятся к одному расчету методом простых итераций при заданных депрессиях вентиляторов. Естественно, что уменьшение невязок расходов воздуха по вентиляторам главного проветривания требует неоднократного применения метода простых итераций в соответствии с алгоритмом, описанным в пункте 1.2.3. Для всех тестов время расчета составило несколько миллисекунд, что позволяет использовать данный метод для анализа вариантов регулирования и расчета значения функции «приспособленности» в генетическом алгоритме.

Таблица 1.2

Результаты тестирования метода расчета сети

| Номер<br>теста | Количество |          |          | Невязка*<br>на контуре, даПа |                          | Приращение*<br>на ветви, м³/с |                          | Количество*<br>итераций<br>на контуре |
|----------------|------------|----------|----------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
|                |            |          |          | на 1-й<br>итерации           | на последней<br>итерации | на 1-й<br>итерации            | на последней<br>итерации |                                       |
|                | ветвей     | контуров | итераций |                              |                          |                               |                          |                                       |
| 1              | 22         | 6        | 13       | 3,83                         | 0,006                    | 122,82                        | 0,044                    | 8                                     |
| 2              | 113        | 30       | 47       | 3,38                         | 0,045                    | 102,05                        | 0,046                    | 8                                     |
| 3              | 138        | 34       | 16       | 9,54                         | 0,051                    | 63,6                          | 0,037                    | 9                                     |
| 4              | 500        | 161      | 36       | 40,96                        | 0,053                    | 389,97                        | 0,047                    | 10                                    |
| 5              | 493        | 160      | 23       | 33,78                        | 0,58                     | 101,11                        | 0,038                    | 8                                     |

\* Максимальное.

Приближение потоков ВГП к заданным потокам для самого сложного случая (сеть из 5-го теста, 6 ВГП с заданными потоками воздуха, местные регуляторы) позволило добиться требуемых невязок за 40 мс. В более простых случаях (примеры из 2-го и 3-го теста с 1–2 ВГП) невязки по ВГП приводились к значениям, которые меньше заданных минимальных значений, за 15–16 мс.

Однако в процессе расчета матриц взаимосвязи и расчета сети с заданными по «хромосоме» параметрами приближение потоков к ВГП не используется, так как в «хромосоме» кодируется значение депрессии каждого вентилятора главного проветривания, по которому задано значение расхода. Это позволяет не тратить время на отдельный расчет депрессий ВГП, а оптимизировать всю систему целиком [129]. В частности, оптимизация по критерию минимальной суммарной невязки расходов воздуха напрямую учитывает при расчете значения функции «приспособленности» невязки расходов по вентиляторам главного проветривания.

### 1.3.3. Модуль регуляторов

Рассмотрим процесс регулирования распределения воздуха в сети на примере простой сети, описанной в предыдущем пункте. Более объемные примеры моделей, составленных при проектировании вентиляционных систем реальных рудников, будут рассмотрены в главе 1.4.

Установим ограничения потока воздуха для ветви № 13:  $Q_{\min} = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_{\max} = 30 \text{ м}^3/\text{с}$ . Текущее значение  $Q_{13} = 16,3 \text{ м}^3/\text{с} < Q_{\min}$ , поэтому поток воздуха в этой ветви необходимо увеличить. В качестве регулируемых ветвей отметим ветви № 3, 4, 14. Регуляторы на начальном этапе не установлены.

После проведения анализа взаимосвязи параметров сети получены следующие результаты.

1. Установлена принципиальная возможность регулирования сети с целью получения заданных потоков воздуха путем установки регуляторов в некоторых из регулируемых ветвей.

2. Найдено три варианта возможного регулирования, и варианты отсортированы по эффективности. Самым эффективным является увеличение депрессии в ветви № 4, далее предлагается увеличение сопротивления ветви № 14 и, наконец, увеличение депрессии ветви № 3. Поскольку ветвь с заданным потоком одна, то и варианты рассматривались только те, которые подразумевают регулирование параметра одной из регулируемых ветвей. Заметим, что по условию задачи ветвь с заданным потоком не входит во множество регулируемых ветвей, т. е. установить там вентилятор или перемычку не представляется возможным.

3. Ветви отсортированы по эффективности регулирования в порядке убывания: № 4 (Н+), № 14 (R+), № 3 (Н+).

Теперь необходимо выбрать один из вариантов. В данном случае выберем единственный вариант с установкой перемычки в ветви № 14. Перейдем к определению для этого варианта параметров, т. е. в данном случае — сопротивления перемычки, обеспечивающего поток воздуха в заданной ветви.

В качестве значений параметров генетического алгоритма оставим значения по умолчанию. Количество «хромосом» в одном «поколении» оставим равным 100, разрядность «генов» — 16 бит, вероятность «скрещивания» — 0,8, вероятность «мутации» — 0,1, пределы по сопротивлению — от 0,0001 до 0,7 ( $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ). В качестве критерия минимизации выставим минимум суммарной невязки потоков воздуха в ветвях. После прогона алгоритма видим, что уже на втором «поколении» невязка была сведена к нулю, т. е. поток воздуха в заданной ветви был приведен к нужному интервалу. Поскольку по условию должно было пройти 50 «поколений» до тех пор, пока алгоритм был остановлен

из-за неизменности значения целевой функции, всего было сгенерировано 51 «поколение». Использование стратегии элитизма позволяет быть уверенным в том, что лучший вариант автоматически «перейдет» в следующее «поколение». Значение приращения сопротивления для регулируемой ветви —  $0,00066$  ( $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ). В заданной ветви при этом получен поток воздуха, равный  $21,94 \text{ м}^3/\text{с}$ , удовлетворяющий условию от  $20$  до  $30 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При том же критерии, но в разных запусках алгоритма, ввиду случайности процесса инициализации первого «поколения» и дальнейшего «воспроизведения», могут быть получены другие значения приращения сопротивления, при которых значение потока воздуха в заданной ветви будет другим (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Результаты нескольких запусков «генетического» алгоритма

| Номер запуска | Граница по $R$ , $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ |         | Полученное $\Delta R_{14}$ , $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ | Полученный расход $Q_{13}$ , $\text{м}^3/\text{с}$ |
|---------------|--------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|               | нижняя                                                       | верхняя |                                                                          |                                                    |
| 1             | 0,0001                                                       | 0,7     | 0,000666                                                                 | 21,939                                             |
| 2             | 0,0001                                                       | 0,7     | 0,00231                                                                  | 28,088                                             |
| 3             | 0,0001                                                       | 0,7     | 0,00345                                                                  | 29,629                                             |
| 4             | 0,0001                                                       | 0,7     | 0,00188                                                                  | 27,179                                             |
| 5             | 0,0001                                                       | 0,7     | 0,00076                                                                  | 22,776                                             |
| 6             | 0,0001                                                       | 0,006   | 0,00089                                                                  | 23,603                                             |
| 7             | 0,0001                                                       | 0,006   | 0,00085                                                                  | 24,656                                             |
| 8             | 0,0001                                                       | 0,006   | 0,00175                                                                  | 27,46                                              |
| 9             | 0,0001                                                       | 0,006   | 0,00028                                                                  | 21,64                                              |
| 10            | 0,0001                                                       | 0,002   | 0,00026                                                                  | 20,43                                              |
| 11            | 0,0001                                                       | 0,002   | 0,00023                                                                  | 20,1                                               |

Анализ результатов прогона алгоритма при разных значениях диапазона возможного регулирования сопротивления показывает, что при определенных значениях сопротивления регулируемой перемычки можно получить потоки воздуха в заданной ветви, близкие к нижнему или к верхнему пределу. Минимуму мощности соответствуют малые значения приращения сопротивления и минимальный поток в заданной ветви:  $\Delta R_{14} = 0,00023$  ( $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ),  $Q_{13} = 20,11 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тогда новое сопротивление регулируемой ветви будет равно с учетом данного приращения  $\Delta R_{14} = 0,00048$  ( $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ ), а новое распределение воздуха представлено на топологической схеме на рис. 1.17.

При большом количестве вариантов запускать для каждого из них генетический алгоритм вручную может быть весьма утомительно. Так как при анализе взаимосвязи параметров сети не проверяется достижимость заданных потоков, то в конечное множество вариантов могут попасть и варианты, заведомо не приводящие к нужному результату, хотя и позволяющие значительно снизить суммарную невязку по всем заданным ветвям при практически реализуемых параметрах регуляторов [130–132]. В этом случае целесообразно использовать специально разработанный для таких целей инструмент автоматического запуска генетического алгоритма с ограничением до 100 «поколений» по всем найденным вариантам. Оставшаяся по результатам работы алгоритма невязка будет сохранена в таблице вариантов. Затем эту таблицу можно выгрузить в Excel,

сохранить и исследовать. Для вариантов с наименьшей невязкой можно вручную запустить алгоритм с большим количеством «поколений», чтобы получить оптимальные параметры регуляторов и рассчитать мощность, затрачиваемую на проветривание. Это позволяет намного ускорить процесс выбора нужного варианта регулирования.

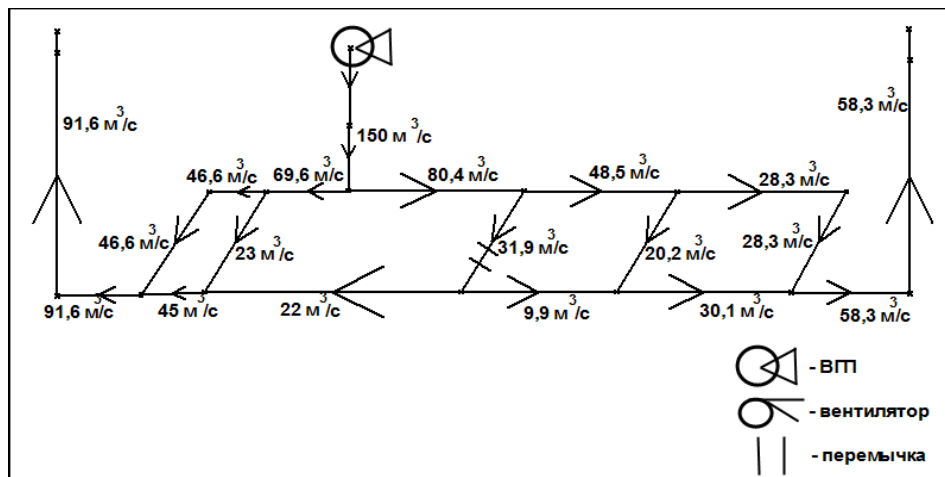


Рис. 1.17. Результаты регулирования распределения воздуха в сети

В 2017 г. модернизированный программный продукт САПР ВС получил свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, получившей название “VentCAD”. Горный институт КНЦ РАН является правообладателем программы.

#### 1.3.4. Выводы по главе 1.3

1. Разработанный редактор топологии позволяет создавать трехмерную модель вентиляционной сети в наглядном виде, что упрощает процесс выбора варианта регулирования системы.

2. Графическая интерпретация процесса расчета распределения воздуха в системе дает возможность оценить сходимость невязок по ветвям и контурам сети, как и количество итераций расчета.

3. Автоматизированный расчет оптимальных параметров регуляторов по всем найденным посредством анализа взаимосвязи параметров сети вариантам ускоряет процесс выбора окончательного варианта регулирования.

### 1.4. Оптимизация размещения регуляторов в вентиляционных системах рудников

#### 1.4.1. Пример регулирования вентиляционной сети рудника Олений ручей

В качестве примера приложения разработанных методов и программных средств к решению реальной задачи, актуальной для горной промышленности, рассмотрим расчет распределения воздуха и регулирование потоков воздуха в вентиляционной сети подземного рудника Олений ручей.

Максимальные параметры вентиляционной сети рудника (расход воздуха и депрессия) будут в период отработки гор. –220 м при достижении им проектной производительности по руде 6 млн т в год.

На первом этапе при проектировании вентиляционной системы была составлена топологическая схема проветривания рудника с детализацией потоков воздуха на гор. –220 м. В модели были учтены вентиляторы главного проветривания и семь перемычек.

На втором этапе был осуществлен начальный расчет распределения воздуха в сети по заданным потокам:

- на ВГП 1  $Q_{137} = 329,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- на ВГП 2  $Q_{138} = 316,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Время расчета составило около 2 мс. Графики невязок для первого расчета методом простых итераций были представлены на рис. 1.8–1.9. Приведем таблицу с заданными потоками для ветвей, в которых скорости воздуха не соответствуют требованиям безопасности (табл. 1.4). В качестве регулируемых ветвей выберем ветви, представленные в табл. 1.5.

Заметим, что в рассматриваемой постановке задачи единственные ветви с заданными расходами воздуха, в которых возможно регулирование, — это две ветви входа-выхода с ВГП. Всего определено 13 заданных ветвей и 21 регулируемая ветвь. Рассчитана исходная невязка по всем заданным ветвям, которая составляет  $119,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Полезная мощность, затрачиваемая на проветривание сети, —  $1423,42 \text{ кВт}$ .

Анализ взаимосвязи параметров сети показал, что подходящих по направлению регулирования вариантов 405.

Чтобы уменьшить количество ручных процедур, был осуществлен автоматический подбор оптимальных параметров с помощью алгоритма поиска для каждого варианта. Этот процесс занял около часа. По каждому варианту было сохранено значение оставшейся после 100 «поколений» невязки для заданных ветвей, конкретные параметры регулируемых ветвей не сохранялись. В табл. 1.6 представлен список тех вариантов, для которых автоматический прогон алгоритма дал значения невязки, близкие нулю, по остальным вариантам значения невязки оказались больше.

Из представленного списка 5 вариантов с одним вентилятором (в 91 ветви) и двумя перемычками, 1 вариант с двумя вентиляторами и одной перемычкой, а также варианты с четырьмя регуляторами в разных соотношениях перемычек и вентиляторов. Помимо всех представленных в списке регуляторов, для каждого варианта также осуществлялось регулирование депрессий ВГП в двух ветвях, эти параметры также кодировались в «хромосоме» алгоритма.

Далее по всем вариантам из списка был проведен ручной запуск генетического алгоритма с предельным количеством поколений от 300 до 500 с целью достижения минимальной невязки по потокам в заданных ветвях. Полученные значения приращений регулируемых параметров и рассчитанная мощность, затрачиваемая на проветривание, сохранялись для каждого варианта, как и итоговое распределение воздуха по ветвям системы. Результаты расчета представлены в табл. 1.7.

Некоторые варианты, по сути, представляли собой один и тот же вариант, так как отдельные ветви из списка регулируемых ветвей являются частями одной выработки, поэтому они не вошли в табл. 1.7. По количеству регуляторов и минимальной мощности, затрачиваемой на проветривание, был выбран вариант 293.

Таблица 1.4

Ограничения по потокам воздуха для заданных ветвей

| Название<br>выработки   | Номер<br>ветви | Сопротивление,<br>$9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ | Расход<br>воздуха,<br>$\text{м}^3/\text{с}$ | Депрессия,<br>даПа | Минимальный<br>расход, $\text{м}^3/\text{с}$ | Максимальный<br>расход, $\text{м}^3/\text{с}$ | Сечение,<br>$\text{м}^2$ | Скорость,<br>м/с |
|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|------------------|
| Откаточный орт-200 (1)  | 7              | 0,00050                                                       | 0,26                                        | 0,00               | 3,58                                         | 114,4                                         | 14,3                     | 0,018            |
| Ю-В откаточный штрек    | 12             | 0,00013                                                       | 5,12                                        | 0,00               | 5,9                                          | 191,2                                         | 23,9                     | 0,214            |
| Откаточный штрек        | 31             | 0,00015                                                       | 162                                         | 3,94               | 3,58                                         | 143,0                                         | 14,3                     | 11,329           |
| С-З откаточный штрек    | 41             | 0,00011                                                       | 162                                         | 2,89               | 3,58                                         | 143,0                                         | 14,3                     | 11,329           |
|                         | 42             | 0,00009                                                       | 162,0                                       | 2,36               | 3,58                                         | 143,0                                         | 14,3                     | 11,329           |
|                         | 43             | 0,00009                                                       | 162,0                                       | 2,36               | 3,58                                         | 143,0                                         | 14,3                     | 11,329           |
|                         | 44             | 0,00009                                                       | 162,0                                       | 2,36               | 3,58                                         | 143,                                          | 14,3                     | 11,329           |
| Ю-В откаточный штрек    | 53             | 0,00011                                                       | 0,26                                        | 0,00               | 5,9                                          | 191,2                                         | 23,9                     | 0,011            |
| Транспортная штольня    | 66             | 0,00005                                                       | 2,91                                        | 0,00               | 10                                           | 482,0                                         | 40,2                     | 0,072            |
| Ю-В откаточный штрек    | 83             | 0,00010                                                       | 0,26                                        | 0,00               | 6,2                                          | 200,0                                         | 25,0                     | 0,010            |
| Откаточный орт-200 (10) | 104            | 0,00067                                                       | 2,48                                        | 0,00               | 3,58                                         | 114,4                                         | 14,3                     | 0,173            |
| Воздухоподающая штольня | 137            | 0,00000                                                       | -328,99                                     | 0,00               | -329,1                                       | -329,1                                        | 37,0                     | 0,000            |
| ВГП 2                   | 138            | 0,00002                                                       | 316,44                                      | 2,00               | 316,5                                        | 316,5                                         | 0,0                      | 0,000            |

Таблица 1.5

## Список регулируемых ветвей

| Название выработки        | Номер ветви | Сопротивление, $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ | Депрессия вентилятора, даПа | Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$ | Депрессия, даПа | Минимальный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ |
|---------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| Квершлаг -220 м           | 10          | 0,00320                                                    | 0,00                        | 160,086                               | 82,008          | 0,00                                      |
| Квершлаг 2                | 39          | 0,00082                                                    | 0,00                        | 114,343                               | 10,721          | 0,00                                      |
| Вентиляционный восстающий | 50          | 0,02778                                                    | 0,00                        | 25,768                                | 18,445          | 0,00                                      |
| Автоуклон                 | 52          | 0,00012                                                    | 0,00                        | 220,962                               | 5,859           | 0,00                                      |
|                           | 55          | 0,00005                                                    | 0,00                        | 106,134                               | 0,563           | 0,00                                      |
| Вентиляционный восстающий | 60          | 0,02778                                                    | 0,00                        | 20,427                                | 11,591          | 0,00                                      |
|                           | 62          | 0,02500                                                    | 0,00                        | 70,912                                | 125,713         | 0,00                                      |
|                           | 69          | 0,02500                                                    | 0,00                        | 70,713                                | 125,009         | 0,00                                      |
|                           | 71          | 0,02778                                                    | 0,00                        | 48,077                                | 64,209          | 0,00                                      |
| Квершлаг гор. 0           | 76          | 0,00039                                                    | 0,00                        | 141,625                               | 7,823           | 0,00                                      |
| Вентиляционный восстающий | 77          | 0,02778                                                    | 0,00                        | 20,427                                | 11,591          | 0,00                                      |
|                           | 81          | 0,02778                                                    | 0,00                        | 1,867                                 | 0,097           | 0,00                                      |
| Воздух от проходки        | 91          | 0,50040                                                    | 0,00                        | 0,256                                 | 0,033           | 0,00                                      |
| Вентиляционный восстающий | 105         | 0,02778                                                    | 0,00                        | 24,596                                | 16,806          | 0,00                                      |
|                           | 106         | 0,02778                                                    | 0,00                        | 24,552                                | 16,746          | 0,00                                      |
|                           | 109         | 0,02778                                                    | 0,00                        | 1,867                                 | 0,097           | 0,00                                      |
| Сбойка с автоуклоном      | 121         | 0,00008                                                    | 0,00                        | 327,096                               | 8,559           | 0,00                                      |
| Вентиляционный восстающий | 127         | 0,02778                                                    | 0,00                        | 24,552                                | 16,746          | 0,00                                      |
|                           | 129         | 0,02778                                                    | 0,00                        | 24,596                                | 16,806          | 0,00                                      |
| Воздухоподающая штольня   | 137         | 0,00000                                                    | 279,09                      | -328,985                              | 0,000           | -329,10                                   |
| ВГП 2                     | 138         | 0,00002                                                    | -164,97                     | 316,436                               | 2,003           | 316,50                                    |

Таблица 1.6

Оптимальные варианты регулирования по критерию минимума суммарной невязки расходов воздуха по заданным ветвям

| Номер<br>варианта | Эффективность | Невязка, м³/с | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 1                 | 2             | 3             | 4              | 5                    | 6              | 7                    | 8              | 9                    | 10             | 11                   |
| 52                | 7,935         | 0,010         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 53                | 7,934         | 0,020         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 58                | 7,869         | 0,220         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 50             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 64                | 7,669         | 0,050         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 106            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 65                | 7,662         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 127            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 70                | 7,573         | 0,050         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 60             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 72                | 7,563         | 0,010         | 91             | (H+)                 | 10             | (H+)                 | 77             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 74                | 7,536         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 105            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 81                | 7,470         | 0,010         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 50             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 82                | 7,470         | 0,030         | 91             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 50             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 88                | 7,270         | 0,010         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 106            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 89                | 7,270         | 0,010         | 91             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 106            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 90                | 7,263         | 0,290         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 127            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 91                | 7,263         | 0,020         | 91             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 127            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 96                | 7,204         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 50             | (R+)                 | 106            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 99                | 7,197         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 50             | (R+)                 | 127            | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 104               | 7,174         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 60             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 105               | 7,174         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 60             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 106               | 7,164         | 0,070         | 91             | (H+)                 | 129            | (R+)                 | 77             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |
| 107               | 7,164         | 0,000         | 91             | (H+)                 | 105            | (R+)                 | 77             | (R+)                 | 39             | (R+)                 |

| 1   | 2     | 3     | 4  | 5    | 6   | 7    | 8   | 9    | 10 | 11   |
|-----|-------|-------|----|------|-----|------|-----|------|----|------|
| 114 | 7,108 | 0,010 | 91 | (H+) | 50  | (R+) | 60  | (R+) | 39 | (R+) |
| 117 | 7,098 | 0,020 | 91 | (H+) | 50  | (R+) | 77  | (R+) | 39 | (R+) |
| 131 | 6,802 | 0,000 | 91 | (H+) | 60  | (R+) | 77  | (R+) | 39 | (R+) |
| 175 | 6,463 | 0,020 | 91 | (H+) | 10  | (H+) | 39  | (R+) | 76 | (H+) |
| 177 | 6,454 | 0,030 | 91 | (H+) | 62  | (H+) | 10  | (H+) | 39 | (R+) |
| 181 | 6,449 | 0,010 | 91 | (H+) | 10  | (H+) | 39  | (R+) | 55 | (R+) |
| 192 | 6,377 | 0,050 | 91 | (H+) | 10  | (H+) | 39  | (R+) | —  | —    |
| 238 | 6,064 | 0,250 | 91 | (H+) | 129 | (R+) | 39  | (R+) | 76 | (H+) |
| 239 | 6,064 | 0,000 | 91 | (H+) | 105 | (R+) | 39  | (R+) | 76 | (H+) |
| 240 | 6,055 | 0,000 | 91 | (H+) | 62  | (H+) | 129 | (R+) | 39 | (R+) |
| 241 | 6,055 | 0,510 | 91 | (H+) | 62  | (H+) | 105 | (R+) | 39 | (R+) |
| 242 | 6,051 | 0,270 | 91 | (H+) | 129 | (R+) | 39  | (R+) | 55 | (R+) |
| 252 | 5,998 | 0,010 | 91 | (H+) | 50  | (R+) | 39  | (R+) | 76 | (H+) |
| 255 | 5,989 | 0,760 | 91 | (H+) | 62  | (H+) | 50  | (R+) | 39 | (R+) |
| 260 | 5,985 | 0,420 | 91 | (H+) | 50  | (R+) | 39  | (R+) | 55 | (R+) |
| 263 | 5,978 | 0,010 | 91 | (H+) | 129 | (R+) | 39  | (R+) | —  | —    |
| 264 | 5,977 | 0,070 | 91 | (H+) | 105 | (R+) | 39  | (R+) | —  | —    |
| 280 | 5,912 | 0,060 | 91 | (H+) | 50  | (R+) | 39  | (R+) | —  | —    |
| 289 | 5,689 | 1,150 | 91 | (H+) | 60  | (R+) | 39  | (R+) | 55 | (R+) |
| 293 | 5,616 | 0,010 | 91 | (H+) | 60  | (R+) | 39  | (R+) | —  | —    |
| 295 | 5,606 | 0,010 | 91 | (H+) | 77  | (R+) | 39  | (R+) | —  | —    |

Таблица 1.7

Результаты расчета значений поправок регулируемых параметров и мощности для выбранных вариантов

| Номер<br>варианта | Мощность,<br>кВт | Невязка,<br>м³/с | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования | Номер<br>ветви | Вид<br>регулирования |
|-------------------|------------------|------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 1                 | 2                | 3                | 4              | 5                    | 6              | 7                    | 8              | 9                    | 10             | 11                   |
| 52                | 2144,5           | 0,02             | 91             | (H+) 81,6            | 10             | (H+) 197,42          | 129            | (R+) 1,8             | 39             | (R+) 4,28            |
| 53                | 2290             | 0,02             | 91             | (H+) 325,8           | 10             | (H+) 197,42          | 105            | (R+) 1,8             | 39             | (R+) 4,28            |
| 58                | 2640,8           | 0,01             | 91             | (H+) 316,5           | 10             | (H+) 264,2           | 50             | (R+) 1,71            | 39             | (R+) 1,37            |
| 64                | 3089,5           | 0,02             | 91             | (H+) 160,4           | 10             | (H+) 345,1           | 106            | (R+) 1,87            | 39             | (R+) 1,7             |
| 70                | 2416,2           | 0,02             | 91             | (H+) 391,7           | 10             | (H+) 213             | 60             | (R+) 1,95            | 39             | (R+) 1,08            |
| 74                | 1531             | 0,01             | 91             | (H+) 111,2           | 129            | (R+) 0,097           | 105            | (R+) 1,615           | 39             | (R+) 4,44            |
| 81                | 1678,8           | 0,01             | 91             | (H+) 330,9           | 129            | (R+) 0,151           | 50             | (R+) 2,384           | 39             | (R+) 1,205           |
| 88                | 1533,5           | 0,01             | 91             | (H+) 43,79           | 129            | (R+) 3,846           | 106            | (R+) 3,736           | 39             | (R+) 3,099           |
| 89                | 1648,5           | 0                | 91             | (H+) 296,3           | 105            | (R+) 0,99            | 106            | (R+) 0,075           | 39             | (R+) 4,105           |
| 90                | 1570,1           | 0,03             | 91             | (H+) 140,1           | 129            | (R+) 2,703           | 127            | (R+) 2,166           | 39             | (R+) 3,708           |
| 91                | 1718,9           | 0,06             | 91             | (H+) 383,5           | 105            | (R+) 0,119           | 127            | (R+) 0,562           | 39             | (R+) 1,278           |
| 96                | 1594,6           | 0,01             | 91             | (H+) 200,5           | 50             | (R+) 0,267           | 106            | (R+) 0,823           | 39             | (R+) 2,58            |
| 104               | 1522,5           | 0,04             | 91             | (H+) 54,51           | 129            | (R+) 1,67            | 60             | (R+) 1,543           | 39             | (R+) 1,77            |
| 114               | 1589,8           | 0,01             | 91             | (H+) 197,9           | 50             | (R+) 1,256           | 60             | (R+) 0,977           | 39             | (R+) 1,768           |
| 131               | 1545,2           | 0,01             | 91             | (H+) 147,8           | 60             | (R+) 0,152           | 77             | (R+) 1,227           | 39             | (R+) 3,843           |
| 175               | 1897,7           | 0,01             | 91             | (H+) 133, 9          | 10             | (H+) 139,4           | 39             | (R+) 2,755           | 76             | (H+) 49,83           |
| 177               | 3371,5           | 0,01             | 91             | (H+) 388             | 62             | (H+) 210,7           | 10             | (H+) 338,7           | 39             | (R+) 3,86            |

Окончание таблицы 1.7

| 1   | 2      | 3    | 4  | 5          | 6   | 7          | 8   | 9          | 10 | 11         |
|-----|--------|------|----|------------|-----|------------|-----|------------|----|------------|
| 181 | 2713,7 | 0,06 | 91 | (H+) 136,2 | 10  | (H+) 291,8 | 39  | (R+) 1,829 | 55 | (R+) 0,011 |
| 192 | 3091,5 | 0,03 | 91 | (H+) 391,7 | 10  | (H+) 325   | 39  | (R+) 1,076 | —  | —          |
| 238 | 1621,6 | 0,07 | 91 | (H+) 193   | 129 | (R+) 4,306 | 39  | (R+) 4,425 | 76 | (H+) 28,14 |
| 240 | 1692,3 | 0,11 | 91 | (H+) 264,4 | 62  | (H+) 68,8  | 129 | (R+) 4,405 | 39 | (R+) 2,115 |
| 241 | 1743,7 | 0,11 | 91 | (H+) 333,1 | 62  | (H+) 69,43 | 105 | (R+) 4,476 | 39 | (R+) 2,15  |
| 242 | 1670,3 | 0,26 | 91 | (H+) 322,2 | 129 | (R+) 3,77  | 39  | (R+) 4,398 | 55 | (R+) 0,001 |
| 252 | 1701,6 | 0,03 | 91 | (H+) 301,3 | 50  | (R+) 2,282 | 39  | (R+) 1,238 | 76 | (H+) 32,94 |
| 255 | 1739,1 | 0    | 91 | (H+) 401,9 | 62  | (H+) 12,83 | 50  | (R+) 4,454 | 39 | (R+) 4,372 |
| 260 | 1531,3 | 0,31 | 91 | (H+) 34,22 | 50  | (R+) 4,468 | 39  | (R+) 4,402 | 55 | (R+) 0,002 |
| 263 | 1614,9 | 0,13 | 91 | (H+) 270   | 129 | (R+) 0,188 | 39  | (R+) 0,952 | —  | —          |
| 264 | 1626,7 | 0,02 | 91 | (H+) 3,558 | 105 | (R+) 4,371 | 39  | (R+) 2,258 | —  | —          |
| 280 | 1649,4 | 0,09 | 91 | (H+) 316,2 | 50  | (R+) 0,179 | 39  | (R+) 0,987 | —  | —          |
| 289 | 1509,2 | 0,78 | 91 | (H+) 25,39 | 60  | (R+) 4,482 | 39  | (R+) 3,634 | 55 | (R+) 0,001 |
| 293 | 1493,5 | 0,04 | 91 | (H+) 20,36 | 60  | (R+) 0,566 | 39  | (R+) 1,254 | —  | —          |

В этом варианте требуется увеличение депрессии посредством установки вентилятора в 91-й ветви и увеличение сопротивления 60-й и 39-й ветвей с помощью перемычек или прочими способами. В табл. 1.8 представлены значения приращений параметров в этих ветвях, а в двух последних строках представлены начальные значения депрессии ВГП и значения, полученные в процессе выбора оптимальных параметров регуляторов с помощью генетического алгоритма. На рис. 1.18 графически отображен процесс автоматической минимизации невязок потоков воздуха по заданным ветвям системы с помощью генетического алгоритма.

Таблица 1.8

Выбранный вариант регулирования

| Номер ветви | Вид регулирования | Значение приращения | Общее значение параметра |
|-------------|-------------------|---------------------|--------------------------|
| 91          | 2                 | (H+) 20,37          | -20,37                   |
| 60          | 0                 | (R+) 0,566          | 0,5939                   |
| 39          | 0                 | (R+) 1,2548         | 1,2557                   |
| 137         | -1                | H = 279,09          | 280,37                   |
| 138         | -1                | H = -164,97         | -185,08                  |

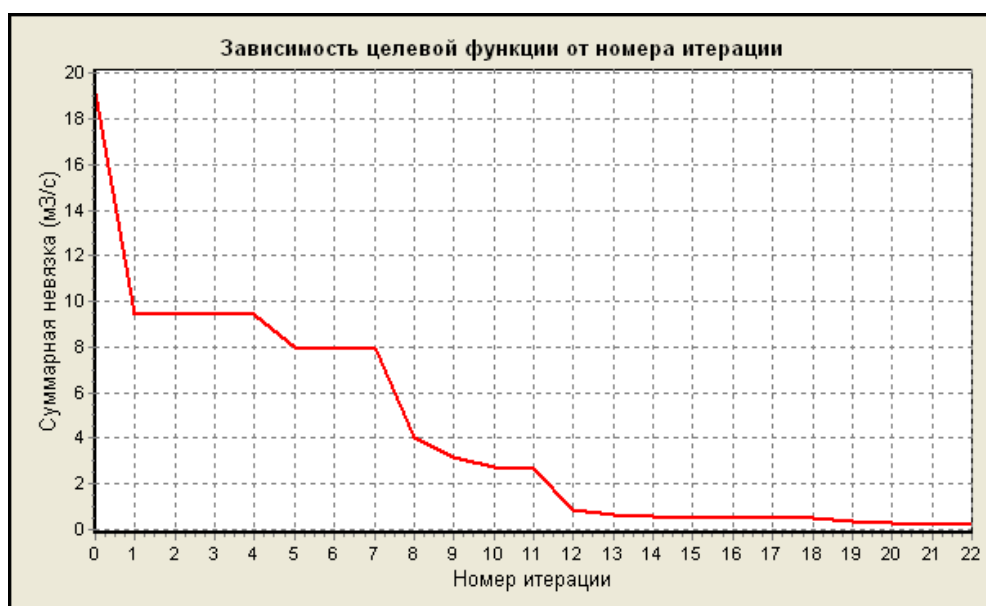


Рис. 1.18. Минимизация невязки потоков воздуха по заданным ветвям для выбранного варианта с помощью генетического алгоритма

На рис. 1.19 показана сеть с дополнительно установленными в соответствии с выбранным вариантом регуляторами.

В 91-й ветви необходима установка вентилятора, работающего в режиме  $Q = 6,38 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $H = 203,7 \text{ Па}$ . Это может быть осевой вентилятор, работающий без перемычки [133, 134]. В 60-й и 39-й ветвях устанавливаются перемычки

с рассчитанной площадью окна 0,48 и 0,33 м<sup>2</sup> соответственно, это говорит о том, что перемычки послужат в данном случае практически изоляторами. Мощность, затрачиваемая на регулирование системы, составит 1494 кВт, достигаемая суммарная невязка по заданным ветвям равна 0,04 м<sup>3</sup>/с.

При проектировании системы был принят другой вариант регулирования, а именно дополнительная установка блоковых вентиляторов в 50-, 81-, 60-, 105-, 106-й и ВМП в 62-, 91-, 52- и 55-й ветвях, с перемычками в 10-й и 39-й ветвях. Принятые при проектировании параметры регуляторов даны в табл. 1.9 и 1.10.

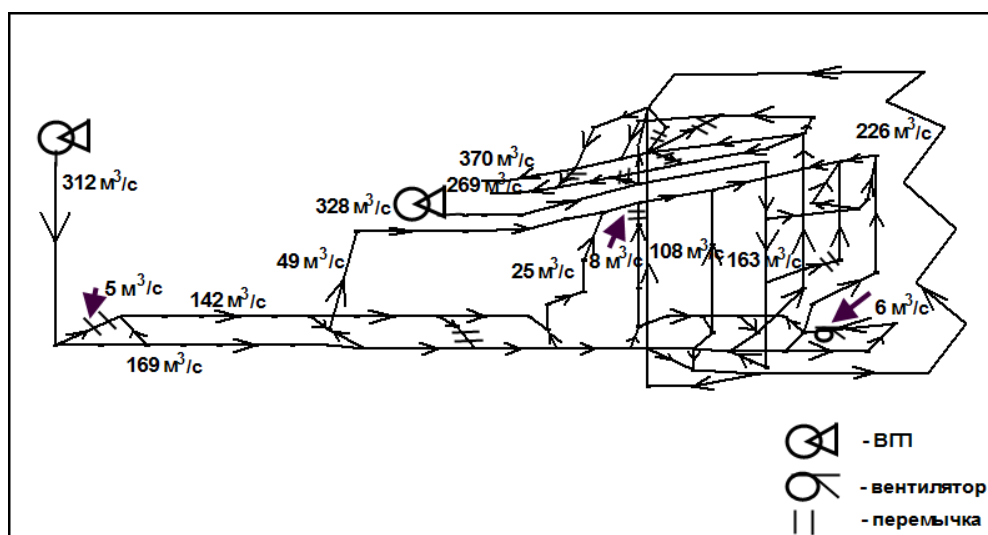


Рис. 1.19. Вентиляционная сеть с регуляторами

Таблица 1.9

Принятые при проектировании параметры перемычек

| Название выработки                                            | Квершлаг воздухоподающего ствола, гор. –220 м | Квершлаг № 1 вспомогательного ствола |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| Номер ветви                                                   | 10                                            | 39                                   |
| Расчетный расход, м <sup>3</sup> /с                           | 156                                           | 201                                  |
| Заданный расход, м <sup>3</sup> /с                            | 128                                           | 180                                  |
| Сопrotивление перемычки, 9,8 Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup> | 0,00548                                       | 0,0106                               |
| Площадь сечения выработки, м <sup>2</sup>                     | 23,9                                          | 23,9                                 |
| Периметр выработки, м                                         | 19,0                                          | 19,0                                 |
| Площадь сечения окна, м <sup>2</sup>                          | 4,7                                           | 3,4                                  |

Невязка по заданным ветвям при таком регулировании может быть уменьшена только до 47,46 м<sup>3</sup>/с, а рассчитанная мощность, затрачиваемая на проветривание сети, составит 7293,35 кВт. Топологическая схема с указанием потоков воздуха и регуляторов представлена на рис. 1.20. Преимуществом

данного варианта является перспективность при расширении фронта работ [135, 136], но для решения конкретной задачи регулирования потоков воздуха по заданным ветвям на горизонте отработки вполне подходят и более экономичные варианты, найденные автоматизированным путем по предложенному методу, в том числе и тот вариант, который был выбран при апробации метода.

Таблица 1.10

Принятые при проектировании параметры вентиляторов

| Место установки                          | Номер ветви | Расход, м <sup>3</sup> /с | Депрессия, Па |
|------------------------------------------|-------------|---------------------------|---------------|
| Распределительные (блоковые) вентиляторы |             |                           |               |
| Блок 4                                   | 50          | 77                        | 395           |
| Блок 5                                   | 81          | 77                        | 570           |
| Блок 6                                   | 60          | 77                        | 565           |
| Блок 7                                   | 105         | 77                        | 401           |
| Блок 8                                   | 106         | 77                        | 555           |
| ВМП в капитальных выработках             |             |                           |               |
| ВМП                                      | 62          | 118                       | 288           |
| ВМП                                      | 91          | 30                        | 451           |
| ВМП                                      | 52          | 40                        | 37            |
| ВМП                                      | 55          | 50                        | 59            |

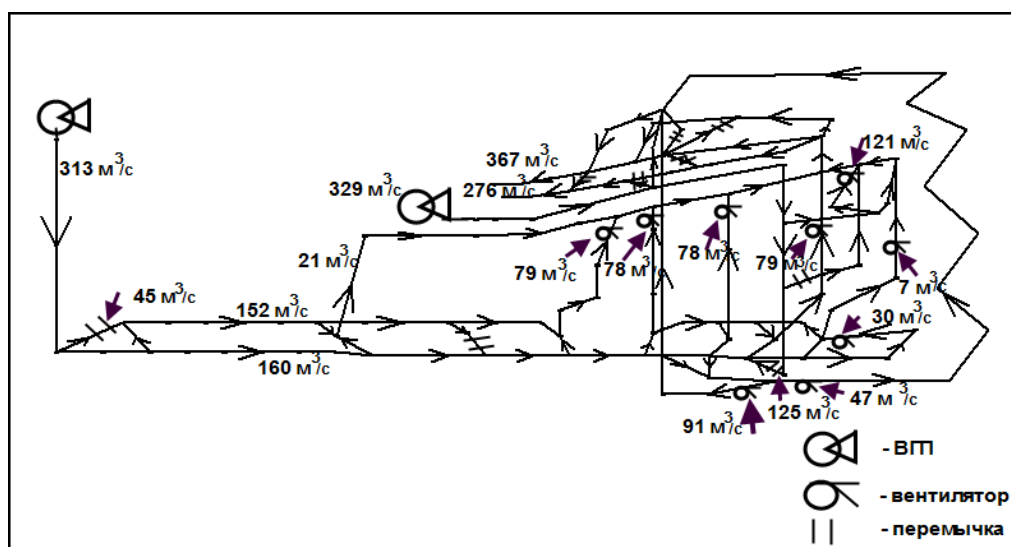


Рис. 1.20. Вентиляционная сеть с регуляторами (проектный вариант)

#### 1.4.2. Пример регулирования вентиляционной сети рудника Партомчорр

В качестве другого примера приложения разработанных методов и программных средств к решению реальной задачи, актуальной для горной промышленности, рассмотрим расчет распределения воздуха и регулирование потоков воздуха в вентиляционной сети подземного рудника Партомчорр.

Максимальные параметры вентиляционной сети рудника Олений ручей (расход воздуха и депрессия) будут в период отработки гор. +90 м.

На первом этапе была составлена топологическая схема проветривания рудника с детализацией потоков воздуха на гор. +90 м. В модели учтены перемычки и вентиляторы, установленные в соответствии с проектом. Процесс расчета распределения потоков воздуха с учетом задания на ВГП  $Q_{113} = 340 \text{ м}^3/\text{с}$  составил 5 мс и представлен графически на рис. 1.21–1.23.



Рис. 1.21. График зависимости невязки депрессии на контуре от номера итерации



Рис. 1.22. График зависимости приращения расхода воздуха на ветви от номера итерации

Приведем список ветвей, в которых скорости воздуха не соответствуют скоростям, требуемым правилами безопасности (табл. 1.11). Их всего 5, не считая ветвь с ВГП.

В качестве регулируемых ветвей выберем ветви, список которых приведен в табл. 1.12. Их всего 12, не считая ветвь с ВГП, из них 3 ветви — заданные.

Таблица 1.11

## Ветви ВС с заданными ограничениями на расходы воздуха

| Название выработки | Номер ветви | Сопротивление, $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ | Расход, $\text{м}^3/\text{с}$ | Депрессия, даПа | Минимальный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ | Максимальный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ | Скорость, м/с |
|--------------------|-------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|
| Откаточный орт (7) | 21          | 0,00117                                                    | 2,687                         | 0,0085          | 3,57                                      | 114,24                                     | 0,188         |
| Откаточный орт (8) | 25          | 0,00103                                                    | 1,232                         | 0,00156         | 3,57                                      | 114,24                                     | 0,086         |
| Откаточный штрек   | 79          | 0,00008                                                    | 1,108                         | 0,0001          | 5,25                                      | 210                                        | 0,053         |
| Откаточный орт     | 121         | 0,0011                                                     | 1,897                         | 0,004           | 3,57                                      | 114,2                                      | 0,133         |
| Откаточный штрек   | 130         | 0,0007                                                     | 1,108                         | 0,0009          | 5,25                                      | 210                                        | 0,053         |
| ВГП                | 152         | 0,00000                                                    | 339,9                         | 0,00            | 340,0                                     | 340,0                                      | 0,00          |

Таблица 1.12

## Регулируемые ветви ВС

| Название выработки            | Номер ветви | Сопротивление, $9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ | Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$ | Депрессия, даПа | Минимальный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ |
|-------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| Вентиляционно-сборочный штрек | 1           | 3,14007                                                    | 0,83                                  | 2,141           | 0,00                                      |
| Откаточный орт (11)           | 35          | 0,50098                                                    | 0,66                                  | 0,216           | 0,00                                      |
| Сбойка с автоуклоном          | 66          | 0,00004                                                    | -14,74                                | 0,009           | 0,00                                      |
|                               | 74          | 0,00008                                                    | -228,13                               | 4,044           | 0,00                                      |
| Вентиляционно-сборочный штрек | 77          | 0,00021                                                    | -411,72                               | 34,920          | 0,00                                      |
| Откаточный штрек              | 79          | 0,00008                                                    | 1,11                                  | 0,000           | 5,25                                      |
| Восстающий                    | 82          | 0,00463                                                    | 137,04                                | 86,948          | 0,00                                      |
|                               | 109         | 0,00231                                                    | 23,71                                 | 1,301           | 0,00                                      |
| Откаточный орт                | 121         | 0,00110                                                    | 1,90                                  | 0,004           | 3,57                                      |
| Откаточный штрек              | 130         | 0,00070                                                    | 1,11                                  | 0,001           | 5,25                                      |
| Восстающий                    | 135         | 0,00278                                                    | 29,37                                 | 2,397           | 0,00                                      |
| Откаточный штрек              | 144         | 0,00026                                                    | -14,26                                | 0,054           | 0,00                                      |
| ВГП                           | 152         | 0,00000                                                    | 339,99                                | 0,000           | 340,00                                    |



Рис. 1.23. График зависимости максимального количества вложенных итераций от номера итерации

Суммарная невязка потоков по заданным ветвям до начала регулирования составила  $13,18 \text{ м}^3/\text{с}$ , рассчитанная мощность, затрачиваемая на проветривание системы, —  $2672 \text{ кВт}$ . Результатом анализа взаимосвязи параметров сети стал список из 118 вариантов. Автоматический запуск генетического алгоритма для них показал хорошую сходимость к нулю суммарной невязки потоков по заданным ветвям (после 100 «поколений»).

В качестве одного из возможных вариантов регулирования можно выбрать 56-й вариант с установкой вентилятора и двух перемычек (одна из которых уже была по проекту, т. е. значение ее сопротивления нужно изменить).

В данном варианте регулирования требуется установка дополнительного вентилятора в 121-й ветви ( $H = 4,8 \text{ Па}$ ), перемычки в 66-й ветви ( $R = 4,41 (9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8)$ ) и в 35-й ветви ( $R = 3,09 (9,8 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8)$ ).

Процесс оптимизации параметров системы с помощью генетического алгоритма по данному варианту графически отображен на рис. 1.24. Полученное распределение потоков воздуха представлено на рис. 1.25.

Мощность, затрачиваемая на проветривание системы, составит  $2679 \text{ кВт}$ , что ненамного превышает исходную мощность, затрачиваемую на проветривание системы до регулирования. Достижимая невязка потоков воздуха по заданным ветвям равна  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### 1.4.3. Выводы по главе 1.4

1. Тестирование разработанного методического и программного обеспечения на моделях реальных вентиляционных сетей показало, что решение задачи регулирования сети при грамотном выборе регулируемых и заданных ветвей может быть упрощено.

2. Анализ взаимосвязи параметров сети позволяет получить список вариантов, каждый из которых приводит к определенному регулированию потоков воздуха в нужном направлении, однако не обязательно сводит невязку к нулю при практически реализуемых значениях параметров регуляторов.

3. Расчет распределения воздуха в системе с заданными депрессиями вентиляторов осуществляется достаточно быстро (несколько миллисекунд даже для сложных сетей), чтобы производить за реальное время минимизацию выбранного критерия посредством генетического алгоритма.

Сходимость суммарной невязки по заданным ветвям к нулю достигается в среднем за 70 «поколений», что служит основой для проведения автоматизированного прогона генетического алгоритма до малых невязок для 300–500 вариантов за 2–3 часа при параметрах алгоритма, установленных по умолчанию (100 «хромосом» для первого «поколения», разрядность «генов» — 16 бит).

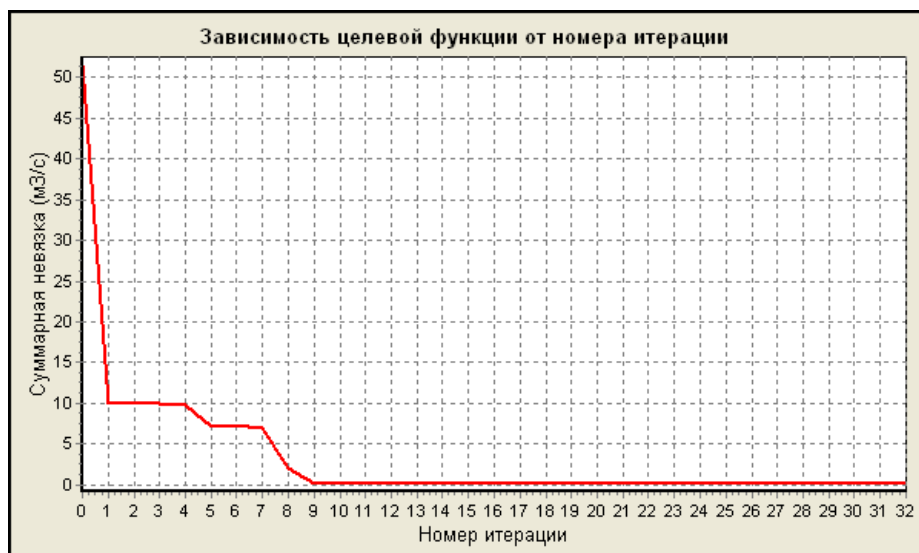


Рис. 1.24. Оптимизация параметров регуляторов по выбранному варианту с помощью генетического алгоритма

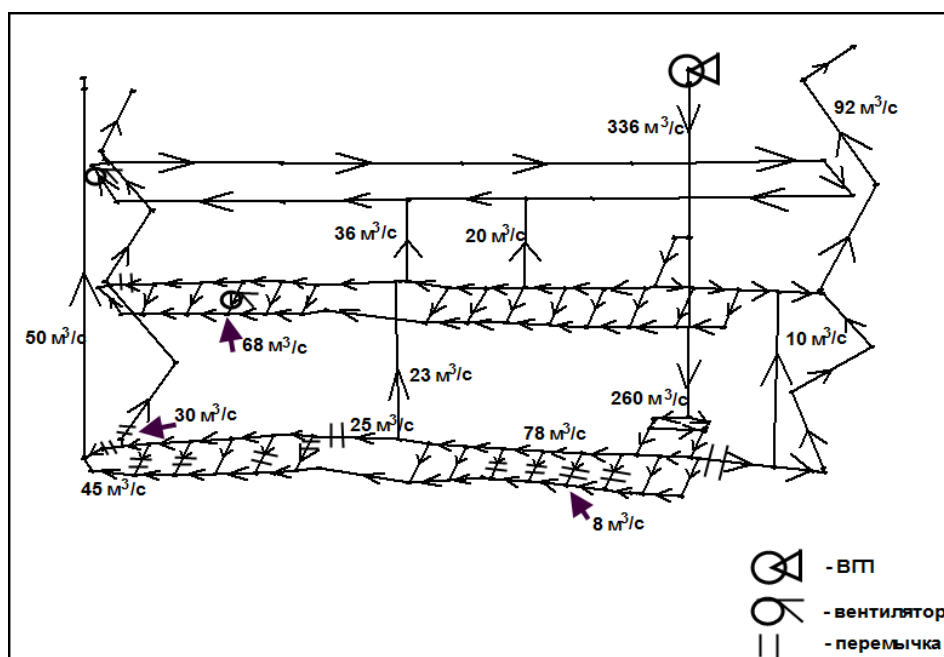


Рис. 1.25. Распределение потоков после регулирования

## **2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РУДНИЧНОЙ АЭРОЛОГИИ**

### **2.1. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб**

Надежность вентиляции определяется эффективностью проветривания выработок за нормативное время и сохранностью вентиляционного оборудования после производства взрывных работ. Многолетняя практика на горнорудных предприятиях показала, что вентиляционные трубопроводы надежно сохраняются, если они располагаются не ближе 20 м от места ведения взрывных работ, что вступает в противоречие с правилами безопасности [137], регламентирующими отставание трубопроводов от забоя не более чем на 10 м. Это особенно актуально для рудников, где проходка осуществляется в скальных массивах при взрывании большого количества ВВ.

Указанное противоречие приводит к необходимости обоснования возможностей сочетания требований заданной эффективности проветривания с максимальной работой вентиляционного оборудования. Подходы к такому обоснованию дает анализ результатов большого объема фундаментальных исследований аэродинамики турбулентных потоков и собственных натурных экспериментов, проведенных сотрудниками Горного института КНЦ РАН совместно со специалистами Кировского ОБГСО на подземных рудниках ОАО «Апатит» и Оленегорском подземном руднике.

#### **2.1.1. Экспериментальное определение дальнотойности струи в горных выработках**

В основе процесса проветривания горных выработок лежит воздухообмен за счет действия турбулентных струй. Поэтому важная задача в организации проветривания — определение структурных характеристик турбулентных течений. Воздухообмен связан с характером распространения турбулентных струй в окружающей среде. Для горных выработок исходящие из вентиляционных трубопроводов струи необходимо рассматривать как стесненные. Степень стеснения струи характеризуется соотношением

$$n = \bar{D}/d ,$$

где  $\bar{D} = 4S/P'$  — приведенный диаметр выработки, м;  $S$  — площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $P'$  — периметр выработки, м;  $d$  — начальный диаметр струи или трубопровода, м.

Экспериментальные исследования воздушных струй, втекающих в тупик, проведены в широком диапазоне параметров стеснения [130, 138–142]. Установлено, что турбулентные струи, образующиеся в ограниченном пространстве, по основным кинематическим и динамическим свойствам значительно отличаются от турбулентных струй, распространяющихся в неограниченном пространстве. Ограниченная турбулентная струя питается за счет турбулизированного воздуха, и его вихри могут иметь любое мгновенное направление скорости. В процессе захвата струей воздуха из окружающего

пространства в ней действуют силы давления и сопротивления, которые направлены против движения струи, вследствие чего происходит ее торможение и уменьшение количества движения. Распространение вентиляционной струи в выработке характеризуется коэффициентом структуры, функционально зависящим от степени стеснения струи. Анализ физической картины взаимодействия потоков показал, что на дальнобойность струи основное влияние оказывает характер ее стеснения, а остальные факторы (расположение струи относительно оси выработки, скорость истечения потока и др.) — значительно меньше. При прочих равных условиях функция изменения дальнобойности струи от стеснения имеет экстремум, так как и малое (ограниченные струи), и большое (свободные струи) стеснение снижает ее дальнобойность. Поэтому важно установить оптимальные параметры, соответствующие формированию максимальной дальнобойности струи.

На основе выполненных исследований [130, 138–142] для различных условий получены эмпирические формулы расчета параметров струи (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Эмпирические формулы расчета параметров струи

| Формула для определения дальнобойности струи $L_d$ , м    | Исследованный диапазон степени стеснения струи $n$ | Источник |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|
| $\frac{(0,42 - 0,51)}{\alpha} \sqrt{S}$                   | 8,06–17,96                                         | [138]    |
| $\frac{\sqrt{S}}{2} \left( 1 + \frac{1}{2\alpha} \right)$ | 5,0–12,0                                           | [139]    |
| $(3,4 - 5,0) \bar{D}$                                     | 5,0–10,0                                           | [140]    |
| $\frac{S}{2\alpha P} + \frac{3S}{5d}$                     | 3,0–14,0                                           | [141]    |
| $7d + 4,1 \bar{D}$                                        | 2,5–20,0                                           | [130]    |
| $6,2 \bar{D}$                                             | 2,5–50,0                                           | [142]    |

Примечание.  $\alpha$  — коэффициент структуры струи ( $\alpha \approx 0,076$ ) [138].

Анализ формул, приведенных в табл. 2.1, показывает, что оптимальная степень стеснения струи для получения максимальной дальнобойности должна быть равна 5, при этом оптимальный диаметр конца трубопровода должен составлять  $0,2 \bar{D}$ .

С учетом полученных значений параметров была рассчитана дальнобойность струи  $L_d$ . Результаты представлены в табл. 2.2.

Совокупность значений  $L_d = f(S)$  (табл. 2.2) в диапазоне исследуемых площадей сечения выработок  $S$  представляет вариационный ряд, эмпирический закон плотности распределения которого отличается от нормального, но достаточно близок к нему в интервале  $L_d = (5,35 - 6,45) \sqrt{S}$ . Таким образом, достоверное значение дальнобойности струи при  $S = 9 - 25 \text{ м}^2$  для  $d = 0,2 \bar{D}$  следует рассчитывать по формуле  $L_d = 5,9 \sqrt{S}$ . Для организации эффективного проветривания

надежностью не менее 90 % от максимума допустимое отставание трубопровода от забоя следует определять исходя из  $L_T = 1,1L_d$  или  $L_T = 6,5\sqrt{S}$ .

Таблица 2.2

Расчетная дальнобойность струи  $L_d$

|                                                |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Площадь сечения выработки $S$ , м <sup>2</sup> | 9    | 14   | 16   | 19   | 20   | 22   |
| Приведенный диаметр выработки $\bar{D}$ , м    | 2,6  | 3,2  | 3,4  | 3,6  | 3,7  | 3,9  |
| Диаметр конца трубопровода $d$ , м             | 0,6  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,9  | 1,0  |
| Степень стеснения струи $n$                    | 4,8  | 4,4  | 4,9  | 5,1  | 4,8  | 4,8  |
| Значение $L_d$ по формулам авторов             |      |      |      |      |      |      |
| [138]                                          | 19,7 | 24,0 | 26,0 | 28,6 | 29,3 | 30,5 |
| [139]                                          | 14,8 | 18,5 | 19,7 | 21,5 | 22,1 | 23,1 |
| [140]                                          | 10,4 | 12,8 | 13,6 | 14,4 | 14,8 | 15,6 |
| [141]                                          | 13,2 | 15,7 | 17,6 | 20,3 | 19,6 | 19,7 |
| [130]                                          | 14,9 | 18,7 | 19,5 | 20,4 | 32,2 | 34,3 |
| [142]                                          | 16,1 | 19,8 | 21,1 | 22,3 | 22,9 | 24,2 |

Авторы провели исследования по установлению дальнобойности струи совместно с работниками Кировского ОВГСО на Кировском руднике ОАО «Апатит» и Оленегорском подземном руднике (табл. 2.3). Как показали результаты, средневзвешенное значение дальнобойности струи составляет  $7,48\sqrt{S}$  и  $8,45\sqrt{S}$  соответственно. Но так как имеются отклонения от среднего как в большую, так и в меньшую сторону, то с учетом коэффициента запаса, равного 1,3, окончательно принимаем максимальное значение отставания трубопровода от забоя  $6,5\sqrt{S}$ .

Таблица 2.3

Экспериментальные данные дальнобойности струи

| Диаметр трубопровода, м       | Сечение выработки, м <sup>2</sup> | Дальнобойность струи, м | Формула         |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Кировский рудник ОАО «Апатит» |                                   |                         |                 |
| 1,0                           | 21,6                              | 50                      | $10,80\sqrt{S}$ |
| 1,0                           | 20,7                              | 23                      | $7,93\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 22,6                              | 35                      | $7,35\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 20,5                              | 35                      | $7,72\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 22,3                              | 32                      | $6,78\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 20,5                              | 39                      | $8,62\sqrt{S}$  |

Окончание таблицы 2.3

| Диаметр трубопровода, м       | Сечение выработки, м <sup>2</sup> | Дальнобойность струи, м | Формула         |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 1,0                           | 22,0                              | 35                      | $7,46\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 20,0                              | 35                      | $7,83\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 22,0                              | 28                      | $5,90\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 20,6                              | 30                      | $6,60\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 20,7                              | 31                      | $6,80\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 19,6                              | 27                      | $6,11\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 22,0                              | 25                      | $5,30\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 17,8                              | 38                      | $9,00\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 18,6                              | 35                      | $8,10\sqrt{S}$  |
| Оленегорский подземный рудник |                                   |                         |                 |
| 0,6                           | 19,7                              | 45                      | $10,13\sqrt{S}$ |
| 0,6                           | 21,0                              | 45                      | $9,82\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 20,5                              | 40                      | $8,83\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 20,0                              | 42                      | $9,39\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 23,5                              | 45                      | $9,28\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 21,0                              | 40                      | $8,73\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 21,5                              | 43                      | $9,27\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 24,0                              | 42                      | $8,57\sqrt{S}$  |
| 0,6                           | 20,7                              | 38                      | $8,35\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 23,7                              | 40                      | $8,22\sqrt{S}$  |
| 1,0                           | 22,5                              | 32                      | $6,74\sqrt{S}$  |

Необходимо учесть, что для формирования струи максимальной дальнобойности конец трубы должен быть выполнен из жесткого материала с указанным выше диаметром и подвешен у стенки выработки не ниже 0,7 ее высоты [143].

### 2.1.2. Численное моделирование аэрогазодинамических процессов

В целях прогноза времени проветривания, необходимого для разжижения токсичных газов в выработке до ПДК, посредством кода COMSOL построена компьютерная модель, позволяющая моделировать процесс проветривания тупиковых выработок после взрывных работ при вариации как расстояния трубопровода до забоя, так и расхода подаваемого воздуха.

Задача решалась следующим образом. Выработка имеет форму прямоугольного параллелепипеда размерами 105×5×5 м ( $S = 25 \text{ м}^2$ ). Трубопровод диаметром 0,9 м ( $S = 0,64 \text{ м}^2$ ) размещается вдоль правой стенки выработки на высоте 2,5 м (центр трубопровода). В компьютерной модели трубопровод имеет форму прямоугольного параллелепипеда площадью сечения для подачи воздуха

0,64 м<sup>2</sup>. На рис. 2.1 представлена принципиальная схема проветриваемой выработки с изображением используемых геометрических объектов.

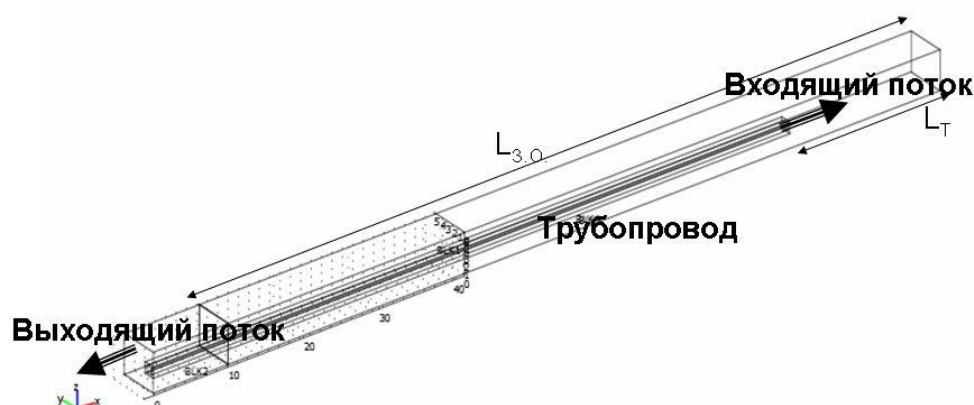


Рис. 2.1. Компьютерная модель схемы проветривания тупиковой выработки

Начальная концентрация газа по оксидам азота в зоне отброса ( $L_{3.0} = 95$  м) принята равной 1000 ПДК, что соответствует условию одновременного взрывания 300 кг ВВ.

Параметры вариации: расстояние от трубопровода до забоя — 10, 15, 20, 25 и 30 м; расход подаваемого воздуха — 4,47, 8,94, 13,41, 17,88 и 22,35 м<sup>3</sup>/с. Первое указанное значение расхода  $Q_{\min}$  соответствует минимальному значению скорости воздуха из трубопровода 7 м/с (только на проветривание от взрывных работ). Остальные значения расходов кратны  $Q_{\min}$ .

Для численного решения поставленной задачи используется следующий подход. На первом этапе рассчитывается стационарное поле скорости, на втором этапе на известное поле скорости «накладывается» уравнение конвективно-диффузионного переноса (в данной ситуации имеем дело с пассивной примесью).

*Первый этап.* Для расчета стационарных полей скорости используется многократно проверенная стандартная ( $k$ - $\varepsilon$ )-модель турбулентности. Данный подход общеизвестен. В нем появляются два дополнительных уравнения, замыкающие известную систему уравнений движения несжимаемой жидкости в приближении Рейнольдса [144, 145].

Осредненные уравнения Рейнольдса записаны в форме документации программного кода COMSOL:

$$\left\{ \left( \eta + \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \left[ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right\} + \rho \vec{u} \nabla \vec{u} + \nabla P = \vec{F};$$

$$\nabla \vec{u} = 0,$$

где  $\rho$  — плотность;  $\vec{u}$  — осредненная скорость;  $t$  — время;  $\nabla$  — оператор Гамильтона;  $\eta$  — динамическая вязкость;  $P$  — давление;  $\vec{F}$  — массовые силы;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  — скорость диссипации

турбулентности. Для последних двух величин записываются и решаются свои дифференциальные уравнения в частных производных [144, 145]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu}{\sigma_k} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla k \right] + \rho \vec{u} \nabla k &= \rho C_\mu \frac{k^2}{2\varepsilon} \left[ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right]^2 - \rho \varepsilon; \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \vec{u} \nabla \varepsilon &= \rho C_{\varepsilon 1} \frac{k}{2} \left[ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right]^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}.\end{aligned}$$

Второе слагаемое в круглых скобках левой части нестационарных уравнений представляет собой коэффициент турбулентной динамической вязкости  $\eta_t = \rho \frac{C_\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon}$ .

Константы, используемые в уравнениях, систематизированы ниже [144, 145]:

$$C_\mu = 0,09; C_{\varepsilon 1} = 0,1256; C_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Граничные условия, типичные для подобных задач [144, 145]:

- на входной границе (трубопровод):  $\vec{u} = u_0$ ,  $k = k_0$  и  $\varepsilon = \varepsilon_0$  (приток);
- на выходной границе (сечение выработки):  $\vec{n} \nabla k = 0$  и  $\vec{n} \nabla \varepsilon = 0$  (нейтральный поток);
- на стенках выработки «работают» соотношения:

$$\begin{aligned}U &= \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{y}{l^*} \right) + \text{const} \right] u_\tau; \quad k = u_\tau^2 / \sqrt{C_\mu}; \\ \varepsilon &= \frac{u_\tau^3}{\kappa y}; \quad u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}; \quad l^* = \nu / u_\tau; \quad \tau_w = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial y},\end{aligned}$$

где  $U$  — распределение скорости в пристенном слое;  $\kappa$  — постоянная Кармана;  $y$  — расстояние от стенки;  $l^*$  — длина смешения;  $u_\tau$  — тангенциальная скорость;  $\tau_w$  — тангенциальное напряжение на стенке выработки;  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Значения плотности и кинематической вязкости, потребляемые программным продуктом, стандартные для температуры около 20 °С, т. е. равны 1,3 кг/м<sup>3</sup> и 2·10<sup>-5</sup> м<sup>2</sup>/с соответственно.

Для достижения стабильного результата в качестве начальных условий использовались ненулевые значения моделируемых физических величин. Для расчетов применяли разнообразные сетки, доступные в программном комплексе COMSOL. Главным решателем стационарной задачи (посредством тестовых попыток) выбран метод GMRES (метод обобщенной минимальной невязки).

*Второй этап.* Основное управляющее уравнение конвективно-диффузионного переноса, используемое в коде COMSOL, является стандартным [144, 145]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla (-D \nabla C + C \vec{u}) = R,$$

где  $C$  — концентрация примеси;  $D$  — коэффициент диффузии;  $R$  — параметр, описывающий генерацию примеси (в нашем случае принят равным нулю). Отдельного пояснения требует коэффициент диффузии. Поскольку физически коэффициент диффузии — функция пространственных переменных, а в уравнении конвективно-диффузионного переноса он принят постоянным, то предложено следующее выражение для его определения:

$$D = \frac{[\eta_t]}{\rho \sigma_t} = \frac{C_\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_t},$$

где  $[\eta_t]$  — среднее значение коэффициента турбулентной динамической вязкости вдоль центральной продольной оси выработки  $[\eta_t] = \frac{1}{L_x} \int_0^{L_x} \eta_t(x; 2,5; 2,5) dx$ ;  $\sigma_t$  — турбулентное число Прандтля — Шмидта, которое в случае пространственных течений принимает значение 0,72 [145].

Напомним, что в качестве начального загрязнения принимаем загазованность в зоне отбросов, равную 1000 ПДК. Поскольку «работаем» с пассивной примесью, то на границах со стенками выработки используем стандартное условие  $\partial C / \partial n = 0$ , а на выходной границе условие конвективного потока  $\vec{n}(-D \nabla C) = 0$ , предполагающее, что вся масса, пересекающая границу, уходит посредством конвекции.

Решателем нестационарной задачи массопереноса выбран метод UMFRACK (высокоэффективный прямой решатель).

Результаты расчетов представлены в табл. 2.4, в которой отражены прогнозные значения времени достижения нормативных условий безопасности по оксидам азота с указанием значений варьируемых параметров.

Таблица 2.4

Прогнозные значения времени достижения  
нормативных условий безопасности

| Расход, м <sup>3</sup> /с | Расстояние до груди забоя $L_T$ , м |     |     |      |      |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|-----|------|------|
|                           | 10                                  | 15  | 20  | 25   | 30   |
| 4,47                      | ~17                                 | ~37 | ~92 | ~215 | ~350 |
| 8,94                      | ~9                                  | ~21 | ~53 | ~85  | ~134 |
| 13,41                     | ~5                                  | ~13 | ~23 | ~74  | ~122 |
| 17,88                     | ~4                                  | ~9  | ~16 | ~51  | ~84  |
| 22,35                     | ~3                                  | ~6  | ~10 | ~29  | ~46  |
| 23,60                     |                                     |     |     |      | ~30  |

Если ориентироваться на максимальное нормативное время проветривания 30 мин, то, как видно из представленных в табл. 2.4 данных, достижение ПДК по оксидам азота при увеличении расстояния до забоя обеспечивается за счет роста расхода воздуха. В таблице затенены клетки, отвечающие выполнению указанного выше условия.

Помимо расчета времени достижения нормативно-безопасной обстановки в выработке, построенные компьютерные модели позволяют визуализировать процесс проветривания как в пространстве, так и во времени. В качестве иллюстраций, позволяющих убедиться в адекватности моделирования процессов проветривания, приведем следующий пример.

Пространственное распределение загрязнения вдоль центральной продольной оси  $X$  на фиксированные моменты времени для расстояния до забоя, равного 15 м, показано на рис. 2.2, на котором наглядно во времени показан процесс достаточно быстрого выдавливания загазованной атмосферы из зоны отбросов. Естественно, что увеличение расхода подаваемого воздуха приводит к существенному сокращению времени проветривания. Например, при минимальном расходе воздуха (рис. 2.2, *а*) через 7 мин наблюдаем ситуацию, когда уровень загрязнения в зоне отбросов существенно превышает нормативный. Причем более «грязным» оказывается район на выходе из выработки. Увеличение минимального расхода воздуха в 3 раза (рис. 2.2, *б*) к указанному моменту времени обеспечивает ситуацию, существенно более «мягкую» по уровню загрязнения, но еще недостаточную по нормативным требованиям. Использование же максимального значения расхода воздуха (рис. 2.2, *в*) убедительно свидетельствует о том, что выработка очистилась, причем, как видно из данных таблицы, для этого достаточно примерно 6 мин.

Для принятых в работе исходных данных по параметрам выработки, количеству и виду взрываемого ВВ, типу анализируемой примеси (оксиды азота) и вариации расстояния трубопровода до забоя и расхода подаваемого воздуха доказана возможность выполнения прогнозных оценок времени достижения безопасных условий труда горнорабочих (ПДК по оксидам азота).

Отметим также, что созданные модели позволяют выполнять прогнозные расчеты процессов выноса из выработки не только газообразных продуктов, но и пыли, то есть существует возможность учесть скорость оседания разномасштабной примеси.

Используемый программный продукт позволяет при необходимости построить кривые динамики концентрации в произвольной точке моделируемой области, а также представить пространственные распределения загрязнений в форме изоповерхностей (рис. 2.3).

Таким образом, по результатам натурных испытаний аэродинамики турбулентных воздушных потоков и численного моделирования процесса выноса из выработки газообразных продуктов взрыва при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок после проведения взрывных работ показана возможность увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб (по сравнению с требованиями правил безопасности) с соблюдением нормативного времени на проветривание за счет роста расхода воздуха.

***При работе дизельной техники по отгрузке горной массы из забоя (после взрывания забоя) отставание трубопровода от груди забоя должно быть не более 10 м, так как при большей длине отставания не обеспечивается полный вынос вредных примесей за время исполнения одного цикла работы ПДМ.***

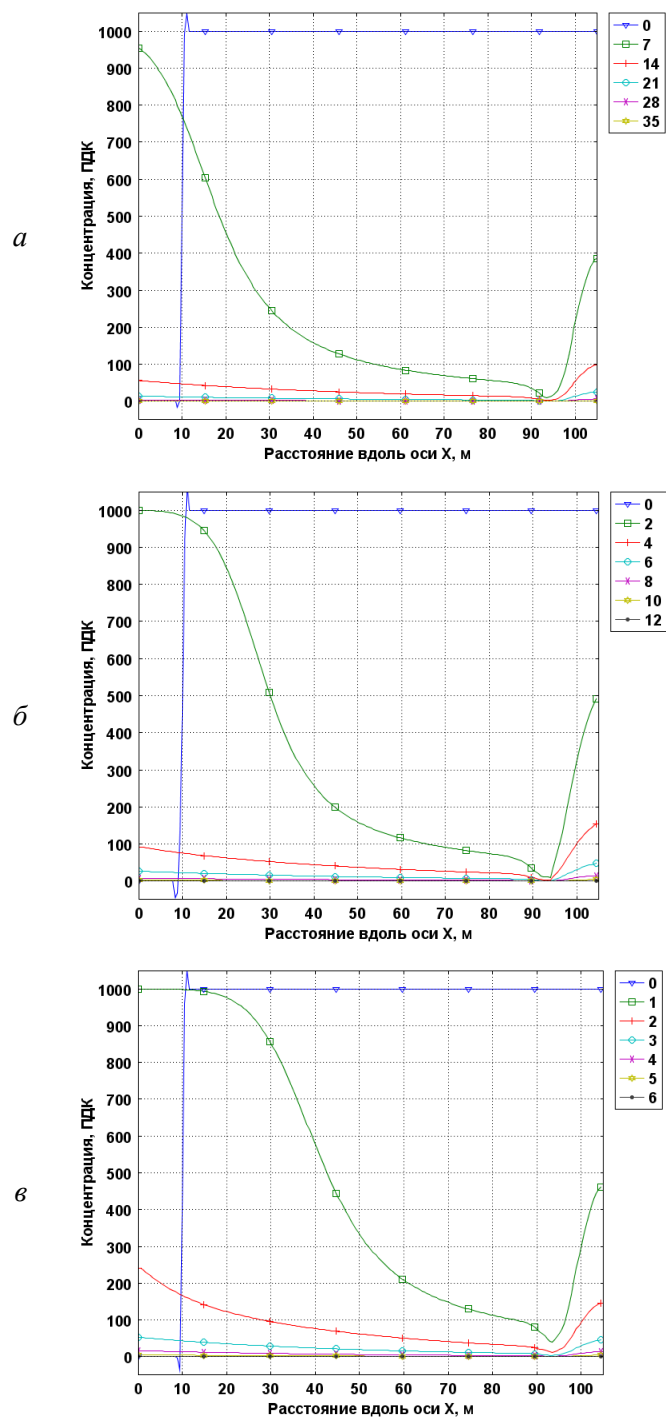


Рис. 2.2. Пространственное распределение загрязнения вдоль оси  $X$  при расстоянии до забоя 15 м и расходе воздуха:  
*a* — 4,47 м³/с (1–6 — время проветривания 0, 7, 14, 21, 28, 35 мин соответственно);  
*б* — 13,41 м³/с (1–7 — то же 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 мин); *в* — 22,35 м³/с  
(1–7 — то же 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 мин)

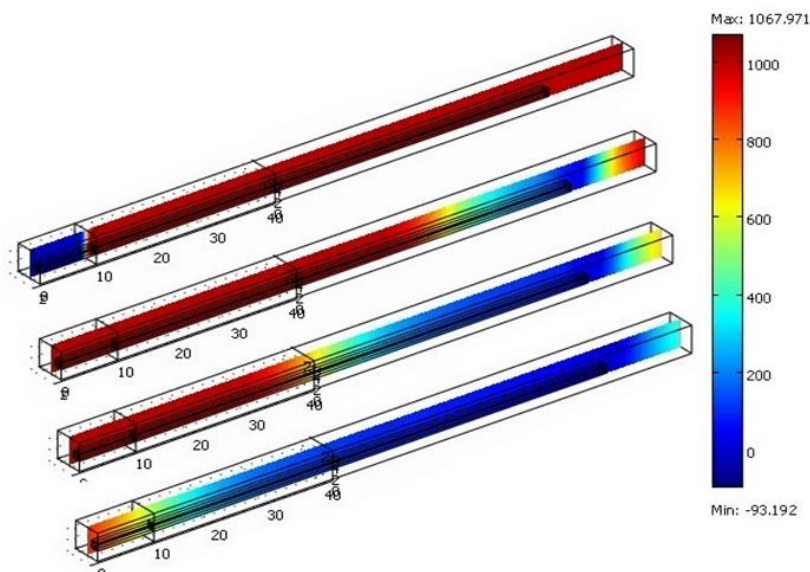


Рис. 2.3. Процесс выноса вредных примесей во времени при проветривании тупиковой выработки по данным численного моделирования

## 2.2. Обоснование возможности проветривания протяженных тупиковых выработок за счет турбулентной диффузии

В рамках обозначенной проблемы методами численного моделирования в объемной постановке рассмотрены две задачи:

- в первой обоснован методический подход к оценке времени проветривания тупиковой выработки;
- во второй выполнены оценки времени проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения.

### 2.2.1. Методический подход к оценке времени проветривания тупиковых выработок на базе трехмерного численного моделирования

Проветривание выработок за счет турбулентной диффузии — процесс удаления газов из ниш и камер, расположенных сбоку сквозной выработки, посредством эжектирующего (отсасывающего) действия вентиляционной струи воздуха, проходящей по сквозной выработке. Согласно Правилам безопасности [137], длина тупиковой выработки, проветриваемой только за счет турбулентной диффузии, не должна превышать 10 м, что не всегда удовлетворяет условиям конкретного горного предприятия.

Предпринята попытка на базе методов численного моделирования в трехмерной постановке исследовать процесс проветривания тупиковой выработки длиной более 10 м при вариации расхода воздуха через основную выработку и уровня ее начального загрязнения.

**Постановка задачи.** Геометрия моделируемой области, которая включает основную выработку размером  $30 \times 5 \times 5$  м и перпендикулярную ей тупиковую выработку с тем же самым поперечным размером  $5 \times 5$  м и изменяющимся размером  $L$  вдоль оси  $Y$  (10, 15 и 20 м), представлена на рис. 2.4.

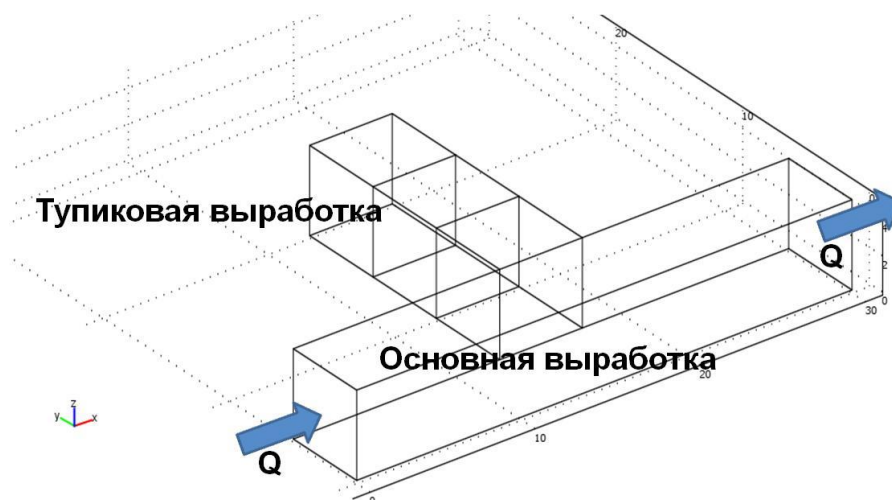


Рис. 2.4. Геометрия моделируемой области  
(основная выработка 30×5×5 м; тупиковая выработка 5×15×5 м)

Направление воздушного потока в основной выработке выбрано вдоль оси  $X$ . Расход воздуха  $Q$  принят равным 6,25, 12,5, 25 и 50 м<sup>3</sup>/с, что обеспечивает среднюю скорость воздуха на входе в основную выработку от 0,25 до 2 м/с.

Предполагается, что при производстве горнопроходческих работ в тупиковой выработке происходит загрязнение ее атмосферы до концентрации  $C_0$  (15, 20 и 25 ПДК, например, по окислам азота). Протяженность области загазованности вдоль оси  $Y$  составляет 5, 10 и 15 м (отсчет от забоя) при указанном выше диапазоне протяженности тупиковой выработки.

**Численная реализация.** Как и в предыдущих работах авторов и их коллег [144–148], задача численного моделирования решалась в два этапа. На первом этапе выполняется расчет аэродинамических характеристик (пространственные распределения скоростного поля и коэффициентов турбулентной вязкости), на втором — решается нестационарное конвективно-диффузионное уравнение, описывающее процесс выноса пассивной примеси из загазованной части тупиковой выработки до достижения уровня ПДК.

Для вычисления аэродинамических характеристик применялась стандартная ( $k$ - $\epsilon$ )-модель турбулентности. В качестве примера результатов расчетов на первом этапе на рис. 2.5 изображено скоростное поле в форме векторов, а по отдельным сечениям приведено распределение турбулентной динамической вязкости. Численные значения свидетельствуют о том, что в тупиковой выработке прогнозируется именно турбулентный режим (расчетные значения на несколько порядков больше динамической вязкости воздуха).

На рис. 2.6 приведено распределение турбулентной динамической вязкости в сечении на полувысоте выработок. Можно отметить существенную неоднородность поля скорости в тупиковой выработке и низкие значения компонент вектора скорости вблизи забоя, что выводит механизм турбулентной диффузии на доминирующую позицию по рассеиванию примеси.

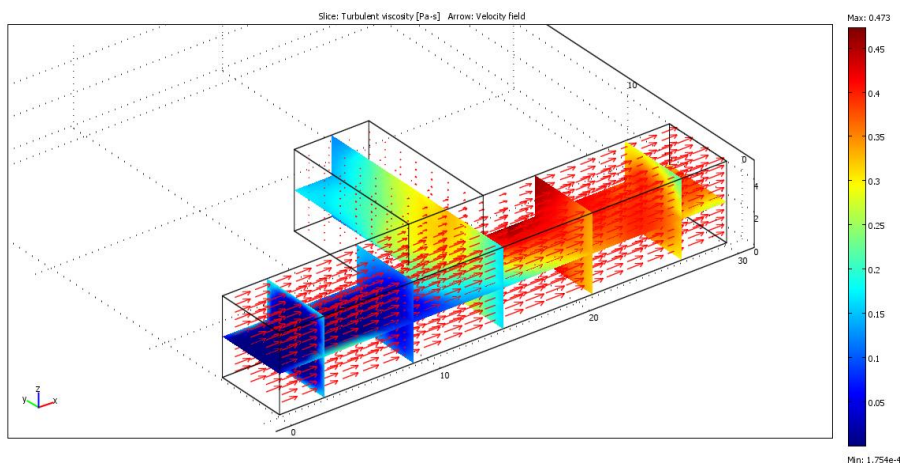


Рис. 2.5. Расчетное поле скорости и распределение (по отдельным сечениям) турбулентной динамической вязкости

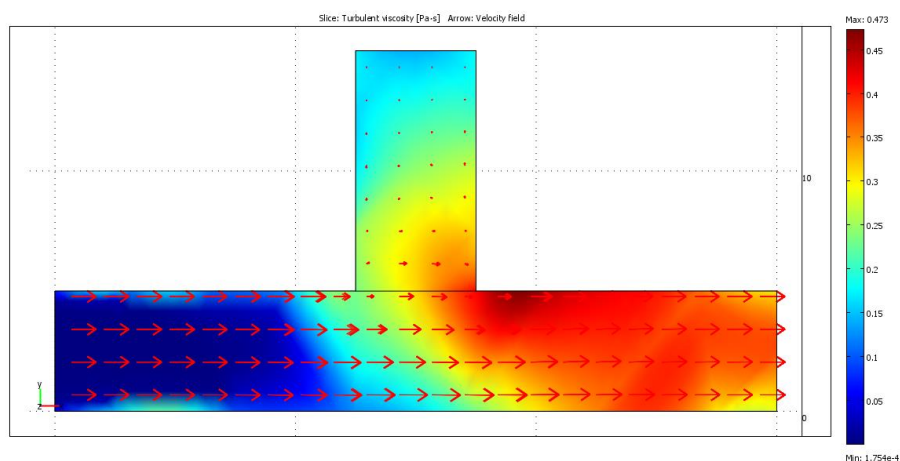
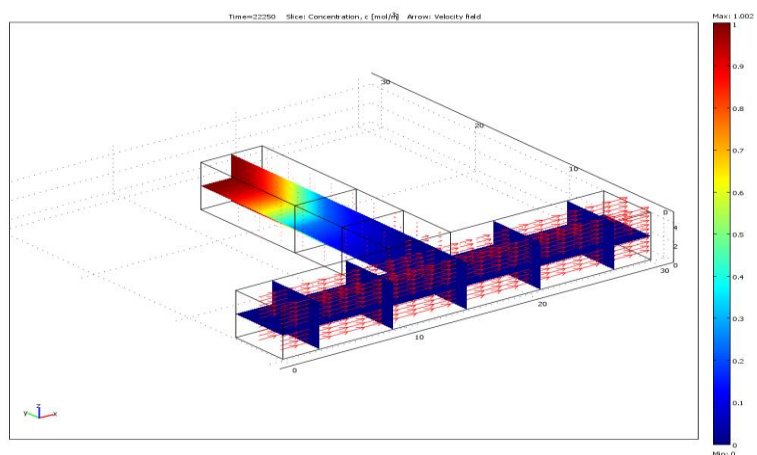


Рис. 2.6. Расчетное поле скорости и распределение турбулентной динамической вязкости в сечении на полувысоте выработок

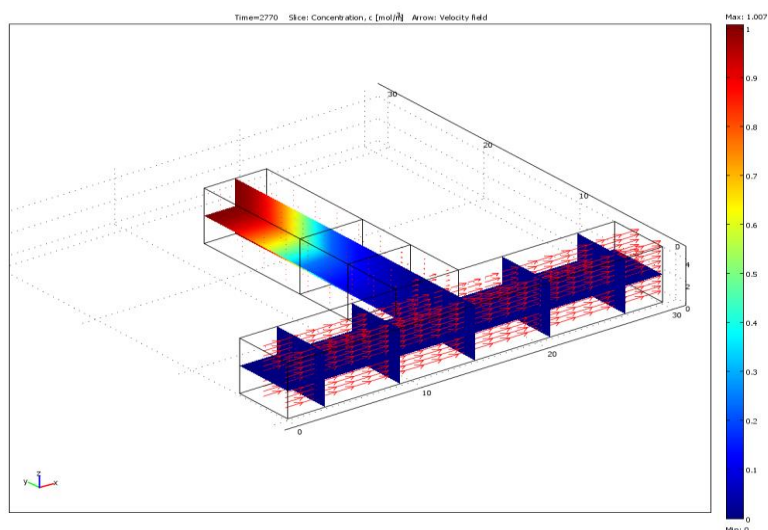
Для численного решения конвективно-диффузионного уравнения, описывающего процесс проветривания тупиковой выработки, предварительно необходимо выполнить операцию осреднения по объему выработок (основной и тупиковой) турбулентной динамической вязкости. Встроенная опция программного продукта COMSOL позволяет выполнить такую операцию через интегрирование турбулентной динамической вязкости по объему моделирования. Используя поправки на объем, плотность и число Прандтля — Шмидта [145, 146], находим коэффициент турбулентной диффузии, принимаемый в программе в качестве постоянной величины.

Рассмотрим два графических примера распределения примеси по пространству выработок на момент достижения уровня ПДК в тупиковой выработке при начальном уровне загазованности 20 ПДК. На рис. 2.7 приведены

такие пространственные распределения загрязнения для тупиковой выработки длиной 20 м при вариации расхода воздуха 6,25 (а) и 50 м<sup>3</sup>/с (б). Сравнительный анализ изображений на рис. 2.7 свидетельствует о том, что имеются практически одинаковые картины распределения примеси. Основное отличие заключается во времени достижения окончания процесса проветривания: при минимальном расходе (6,25 м<sup>3</sup>/с) время проветривания составляет примерно 22 250 с, при максимальном (50 м<sup>3</sup>/с) — около 2 770 с. Таким образом, время проветривания при прочих равных условиях существенным образом зависит от количества воздуха, подаваемого в основную выработку.



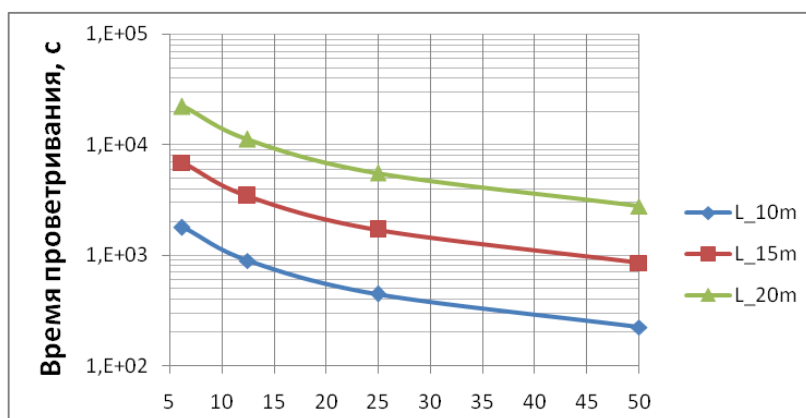
а



б

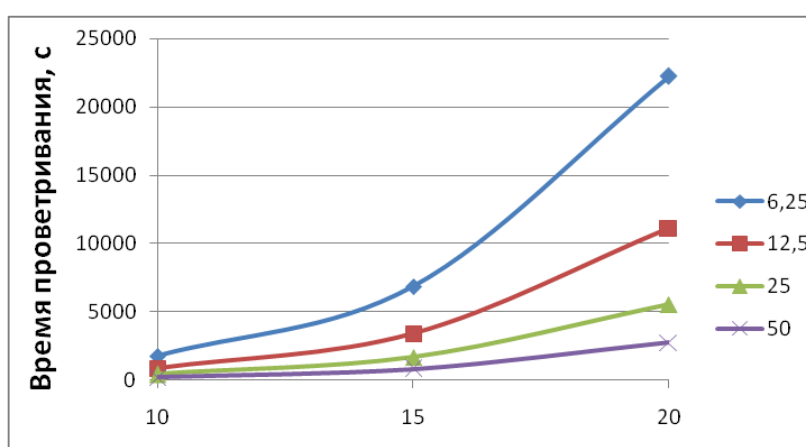
Рис. 2.7. Пространственное распределение примеси на момент достижения уровня ПДК при вариации расхода воздуха 6,25 м<sup>3</sup>/с (а) и 50 м<sup>3</sup>/с (б)

Результаты расчетов процесса проветривания тупиковой выработки для фиксированного уровня начальной загазованности в 20 ПДК при вариации расхода воздуха и длины выработки в графической форме представлены на рис. 2.8.



Расход, м³/с

*a*



Длина выработки, м

*б*

Рис. 2.8. Зависимости времени проветривания  $T$  (в секундах) тупиковой выработки от расхода воздуха при вариации длины выработки (*a*) и длины выработки при вариации расхода воздуха (*б*)

**Анализ результатов расчетов.** Представленные графические зависимости (рис. 2.8) описываются функциями — степенными  $T = A_1 \cdot Q^{B_1}$  (рис. 2.8, *a*) и экспоненциальными  $T = A_2 \cdot \exp(B_2 L)$  (рис. 2.8, *б*), где значения коэффициентов  $A_1$ ,  $B_1$  и  $A_2$ ,  $B_2$  приведены в табл. 2.5 и 2.6.

Из табл. 2.5 и 2.6 следует, что коэффициенты  $B_1$  и  $B_2$  достаточно слабо изменяются при вариации длины выработки и расхода воздуха соответственно. Представляется, что с учетом небольшого диапазона изменения коэффициентов  $B_1$  и  $B_2$  к ним вполне допустим подход арифметического среднего. Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  претерпевают заметные изменения и могут быть описаны экспоненциальной и степенной функциями (коэффициенты достоверности аппроксимации 0,9984 и 1,000 соответственно):

$$T = 932 \cdot \exp(0,252L) \text{ и } A_2 = 932Q^{-0,999}.$$

Таблица 2.5

Коэффициенты аппроксимации  $A_1$ ,  $B_1$  степенных функций

| Длина выработки, м | Коэффициент $A_1$ | Коэффициент $B_1$ |
|--------------------|-------------------|-------------------|
| 10                 | 11 250            | –1,000            |
| 15                 | 43 229            | –1,003            |
| 20                 | 139 759           | –1,002            |

Таблица 2.6

Коэффициенты аппроксимации  $A_2$ ,  $B_2$  экспоненциальных функций

| Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с | Коэффициент $A_2$ | Коэффициент $B_2$ |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| 50                                | 18,769            | 0,2511            |
| 25                                | 37,416            | 0,2514            |
| 12,5                              | 74,712            | 0,2516            |
| 6,25                              | 149,730           | 0,2515            |

Применяя описанный выше подход к анализу результатов численных экспериментов при вариации начальной концентрации  $C_0$ , мы можем аналитически описать прогнозируемое время проветривания тупиковой выработки для условий снижения начальной концентрации до ПДК следующими близкими соотношениями (табл. 2.7). В табл. 2.7 формулы (2.1), (2.3) и (2.5) соответствуют обработке результатов численных экспериментов по определению времени проветривания  $T$  (в секундах) тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха при вариации длины выработки, а формулы (2.2), (2.4) и (2.6) — от длины выработки при вариации расхода воздуха.

Таблица 2.7

Вид аналитических зависимостей прогноза времени проветривания тупиковых выработок

| Начальная концентрация $C_0$ , ПДК | Аналитическая зависимость                                    | Номер |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|
| 15                                 | $T(Q, L) = 862 \cdot Q^{-1,004} \cdot \exp(0,2513 \cdot L)$  | (2.1) |
|                                    | $T(Q, L) = 862 \cdot Q^{-1,013} \cdot \exp(0,2529 \cdot L)$  | (2.2) |
| 20                                 | $T(Q, L) = 932 \cdot Q^{-1,002} \cdot \exp(0,2520 \cdot L)$  | (2.3) |
|                                    | $T(Q, L) = 932 \cdot Q^{-0,999} \cdot \exp(0,2514 \cdot L)$  | (2.4) |
| 25                                 | $T(Q, L) = 1013 \cdot Q^{-1,002} \cdot \exp(0,2500 \cdot L)$ | (2.5) |
|                                    | $T(Q, L) = 1013 \cdot Q^{-1,000} \cdot \exp(0,2512 \cdot L)$ | (2.6) |

С физической точки зрения полученные соотношения справедливы. Действительно, при постоянстве всех аэродинамических характеристик модели увеличение начальной концентрации и длины выработки будет способствовать увеличению времени проветривания, а рост расхода, безусловно, должен приводить к сокращению времени проветривания.

В представленных соотношениях значения параметров степенной и экспоненциальной функций изменяются достаточно слабо, значит, есть возможность снова воспользоваться средними значениями, а коэффициент в выражениях, который определяется уровнем начальной концентрации, описать в форме линейного соотношения.

Таким образом, получаем аналитическое выражение, позволяющее оценить время проветривания тупиковой выработки при принятых модельных предположениях для конкретных диапазонов варьируемых параметров  $C_0$ ,  $Q$ ,  $L$  ( $15 \leq C_0 \leq 25$ ) ПДК, ( $6,25 \leq Q \leq 50$ ) м<sup>3</sup>/с, ( $10 \leq L \leq 20$ ) м [149]:

$$T(C_0, Q, L) = (15,1C_0 + 633,6) \cdot Q^{-1,003} \cdot \exp(0,2511L).$$

Реализованный методический подход может быть использован (с небольшими модификациями) как для других геометрических размеров выработок, так и для других типов описания начальных условий загазованности тупиковой выработки, что позволит прийти к более общей форме прогноза времени проветривания тупиковой выработки для некоторых типовых ситуаций.

### **2.2.2. Численное моделирование процесса проветривания одиночной тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения**

Применение высокопроизводительных систем разработки с обрушением руды и покрывающих пород при добыче полезных ископаемых из мощных месторождений приводит к образованию зон обрушения. Образование аэродинамической связи горных выработок с поверхностью через зону обрушения оказывает существенное влияние на вентиляционную систему рудника. Утечка воздуха или подсос проявляются в том, что они изменяют количество доходящего до забоев воздуха и нарушают планируемый воздухообмен в блоках и отдельных забоях. Изучению явлений, связанных с фильтрационными процессами, протекающими в пористых средах обрушенных зон, посвящено значительное количество исследований, которые были направлены в основном на установление количественных значений суммарных утечек по отдельным участкам, блокам и в целом по руднику. Однако до настоящего времени недостаточно изучен вопрос проветривания тупиковой выработки, соприкасающейся со стороны ее торца с обрушенными рудами и породами при наличии утечки-подсоса воздуха через зону обрушения.

Данные условия характерны для системы разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды, в которой проветривание выработок, расположенных сбоку от основной выработки осуществляется посредством эжектирующего действия вентиляционной струи воздуха, проходящей в основной выработке, проветриваемой за счет общешахтной депрессии. При этом утечка максимально проявляется в летний, самый тяжелый для вентиляции период года [150], когда более 40 % подаваемого в рудник воздуха теряется, не доходя до эксплуатационных участков, а подсос — в зимний.

Эффективность выноса вредных примесей из тупикового забоя зависит от геометрических параметров горной выработки и ее длины. Основным, помимо геометрических характеристик выработки, параметром,

влияющим на эффективность проветривания за счет механизма турбулентной диффузии, является скорость воздуха в примыкающей основной выработке. Влияние утечки-подсоса воздуха через зону обрушения при проветривании тупиковой выработки, соприкасающейся с обрушенными рудами и породами, с учетом указанного выше механизма переноса ранее практически не учитывалось.

На данном этапе исследований рассмотрена длина тупиковой выработки 20 м, при которой, согласно федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [137], не допускается проветривание за счет турбулентной диффузии. Строго говоря, наличие в тупиковой выработке утечки-подсоса воздуха переводит процесс ее проветривания в другую категорию, поскольку помимо механизма турбулентной диффузии начинает «работать» целенаправленный конвективный перенос, обусловленный не только движением воздуха по основной выработке.

Применительно к системе разработки с поэтажным обрушением, применяемой на подземных рудниках АО «Апатит», для одиночной тупиковой выработки, соприкасающейся с обрушенными рудами и породами, величина утечки, по данным депрессионной съемки [150], в среднем составляет 0,02–0,07 м<sup>3</sup>/с. Указанный диапазон значений был использован при моделировании процесса проветривания, в том числе и при учете подсоса.

Процесс моделирования в объемной, но упрощенной геометрии выработок, результаты которого представлены в работах [151, 152], обеспечивает при достаточно простой расчетной сетке незначительные затраты времени на численные эксперименты. Численные эксперименты в реальной геометрии за счет усложнения расчетной сетки при одинаковых вычислительных мощностях компьютеров требуют примерно в 7–8 раз больше процессорного времени и примерно в 2 раза увеличивают требования по ресурсам памяти.

Область моделирования включает основную выработку протяженностью 65 м, сечением 18,4 м<sup>2</sup> и перпендикулярную ей тупиковую выработку с тем же самым поперечным сечением и длиной 20 м вдоль оси Y. Направление воздушного потока в основной выработке выбрано вдоль оси X, направление утечки-подсоса — вдоль оси Y (рис. 2.9).

Расход воздуха, поступающего в основную выработку  $Q_{in}$ , рассмотрен в диапазоне от 6,25 до 50,0 м<sup>3</sup>/с. Для каждого варианта выбранного расхода воздуха  $Q_{in}$  рассмотрено пять ситуаций, различающихся расходами воздуха через зону обрушения  $Q_{тур}$ : базовый (без утечки воздуха  $Q_{тур} = 0$ ); утечка-подсос составляет  $\pm 0,02$  м<sup>3</sup>/с; утечка-подсос составляет  $\pm 0,07$  м<sup>3</sup>/с.

Использован ранее апробированный двухшаговый методический подход [145–149, 151, 152]. На первом шаге моделирования выполнялся расчет аэродинамических процессов в горных выработках с привлечением стандартной ( $k$ - $\epsilon$ )-модели турбулентности, на втором — моделировался процесс выноса вредных примесей заданной начальной концентрации из выработки путем решения конвективно-диффузионного уравнения и выбора осредненного по объему моделирования коэффициента

турбулентной динамической вязкости с переходом к коэффициенту турбулентной диффузии через число Прандтля — Шмидта. Для выполнения расчетов была использована программа COMSOL.

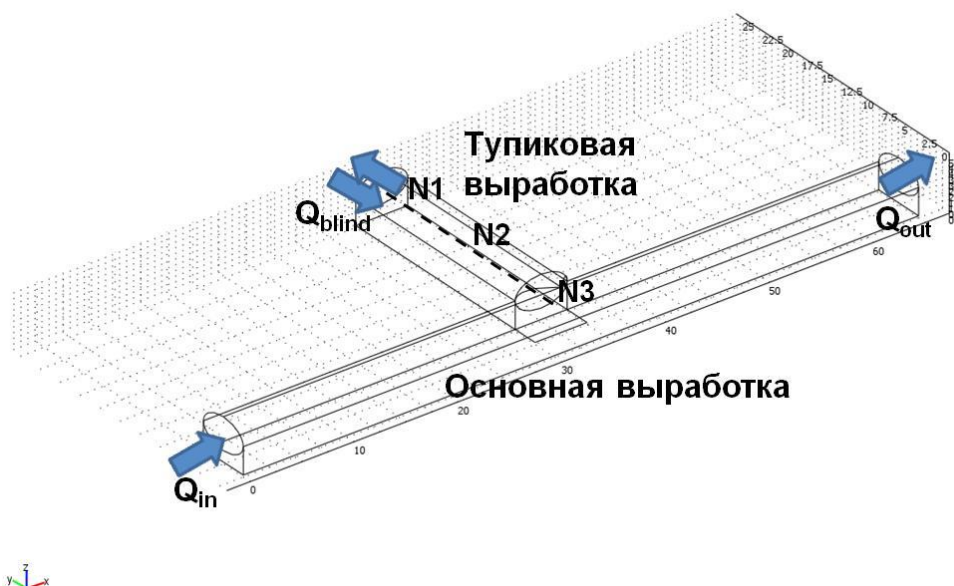


Рис. 2.9. Геометрия моделируемой области (основная и тупиковая выработки) и точки контроля концентрации загрязнения (N1, N2, N3)

Как и в работах [151–153], основной целью исследования являлось определение влияния утечки-подсоса воздуха на время достижения нормативного уровня загазованности в тупиковой выработке по сравнению с базовой ситуацией  $Q_{\text{tup}} = 0$ .

Выполнено две серии численных экспериментов:

- в первой исследовалось влияние утечки-подсоса воздуха на время достижения нормативного уровня ПДК по сравнению с базовой ситуацией  $Q_{\text{blind}} = 0$  при фиксированном уровне начального загрязнения атмосферы  $C_0$  в объеме тупиковой выработки, равном 25 ПДК (по условным окислам углерода);
- во второй изучался эффект вариации уровня начального загрязнения атмосферы  $C_0$  тупиковой выработки (от 2 до 25 ПДК) на время проветривания исключительно посредством механизма турбулентной диффузии для базовой ситуации ( $Q_{\text{blind}} = 0$ ) при минимальном расходе воздуха в основной выработке.

Результаты интегрирования конвективно-диффузионного уравнения переноса пассивной примеси представлены ниже. В табл. 2.8 представлены значения осредненных коэффициентов турбулентной диффузии по выработкам для максимального значения расхода воздуха в основной выработке и вариации расхода утечки-подсоса. Из данных табл. 2.8 видно, что осредненный коэффициент турбулентной диффузии в основной выработке практически не зависит от величины утечки-подсоса. Влияние утечки-подсоса на величину осредненного коэффициента турбулентной диффузии в тупиковой выработке невелико (не более 4 %).

Для остальных значений расхода в основной выработке работает линейная зависимость: во сколько раз уменьшается расход, в такое же число снижается значение осредненного коэффициента турбулентной диффузии.

В качестве примера результатов первой серии расчетов на рис. 2.10 представлены пространственные распределения концентрации примеси по области моделирования на конкретные моменты времени: 15 (рис. 2.10, *а*), 30 (рис. 2.10, *б*), 45 (рис. 2.10, *в*) и 60 минут (рис. 2.10, *г*). Для ситуации, изображенной на рис. 2.10, приняты следующие значения расхода воздуха по основной выработке  $Q_{in} = 6,25 \text{ м}^3/\text{с}$  и величине подсоса  $Q_{blind} = +0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ .

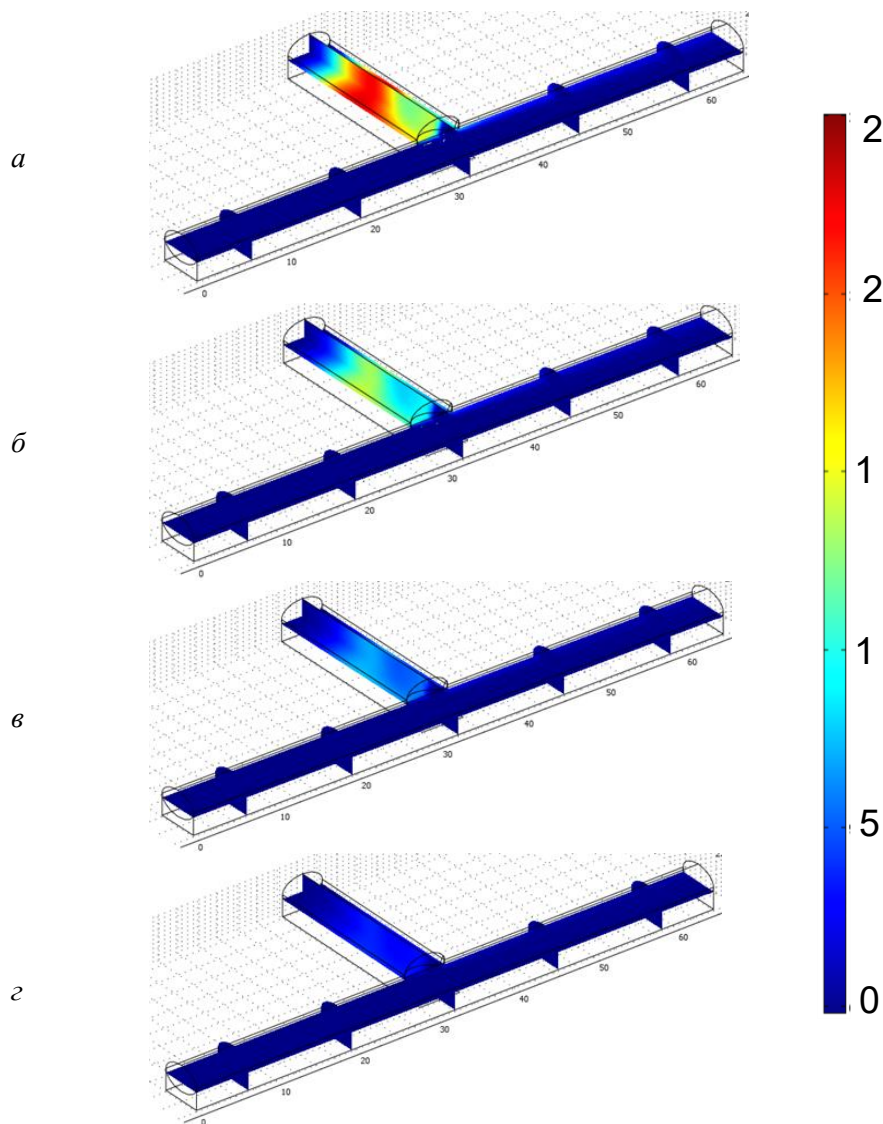


Рис. 2.10. Пространственное распределение примеси на конкретные моменты времени: 15, 30, 45 и 60 минут (*а*, *б*, *в*, *г* соответственно).  $Q_{in} = 6,25 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{blind} = +0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ . Справа указана концентрация в единицах ПДК

Таблица 2.8

Осредненные коэффициенты турбулентной диффузии в выработках модели при расходе воздуха  $Q_{in} = 50 \text{ м}^3/\text{с}$  в основной выработке и вариации утечки-подсоса  $Q_{blind}$

| $Q_{blind}, \text{ м}^3/\text{с}$ | Осредненные коэффициенты турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$ |                     |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|
|                                   | Основная выработка                                                    | Тупиковая выработка |
| Утечка $-0,07$                    | 0,0432                                                                | 0,0673              |
| Утечка $-0,02$                    | 0,0432                                                                | 0,0699              |
| 0                                 | 0,0433                                                                | 0,0696              |
| Подсос $+0,02$                    | 0,0433                                                                | 0,0692              |
| Подсос $+0,07$                    | 0,0433                                                                | 0,0684              |

Эффект подсоса воздуха наглядно проявляется в визуально заметном со временем увеличении области «чистой» атмосферы, начиная от торца тупиковой выработки, и в постепенном вытеснении загрязнения в направлении основной выработки. Максимальные значения концентрации примеси в тупиковой выработке на указанные моменты времени составляют 21,6, 13,6, 7,4 и 3,8 ПДК соответственно.

Результаты расчетов времени проветривания  $T$  в соответствии с указанными выше расходами воздуха в основной выработке  $Q_{in}$  и утечки-подсоса через торец тупиковой  $Q_{blind}$  представлены в графической форме на рис. 2.11.

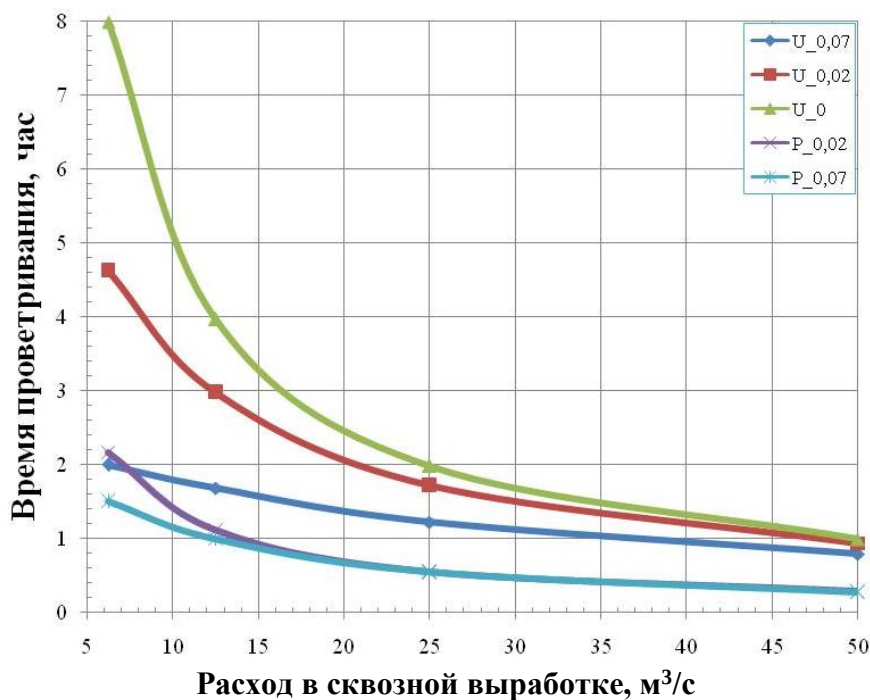


Рис. 2.11. Прогнозное время проветривания тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха в сквозной выработке с учетом утечки-подсоса через зону обрушения (U — утечка; P — подсос)

Все графики рис. 2.11 с коэффициентами достоверности, близкими к 1, аппроксимируются степенной функцией  $T = A \cdot Q_{in}^{-B}$  со своими коэффициентами аппроксимации  $A$  и  $B$  для рассматриваемых вариантов утечки-подсоса. Значения коэффициентов аппроксимации приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Коэффициенты аппроксимации степенной функции  $T = A \cdot Q_{in}^{-B}$  времени проветривания  $T$  тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха  $Q_{in}$  в основной выработке при вариации утечки-подсоса  $Q_{blind}$

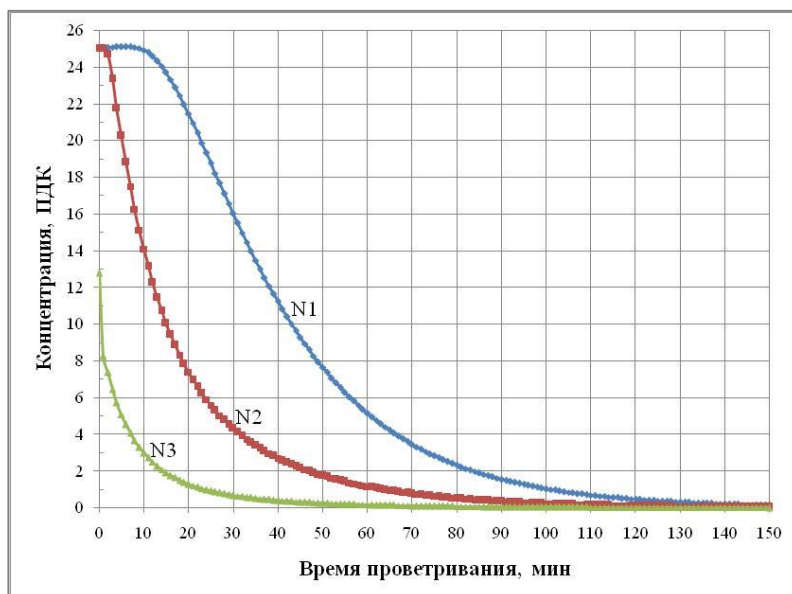
| $Q_{blind} \text{ м}^3/\text{с}$ | $A$   | $B$  |
|----------------------------------|-------|------|
| Утечка $-0,07$                   | 4,860 | 0,44 |
| Утечка $-0,02$                   | 20,02 | 0,77 |
| 0                                | 50,23 | 1,00 |
| Подсос $+0,02$                   | 13,36 | 0,99 |
| Подсос $+0,07$                   | 7,258 | 0,82 |

Анализ графиков (рис. 2.11) показывает, что максимальное время проветривания имеет место при отсутствии утечки-подсоса. В этом случае время проветривания меняется от самого продолжительного (почти 8 ч) при минимальном значении  $Q_{in}$  до  $\sim 1$  часа при максимальном расходе воздуха в основной выработке. При учете утечки-подсоса имеем существенное снижение времени проветривания. Причем эффект подсоса более существенный. В первую очередь в терминах абсолютных величин этот эффект значителен при малых расходах воздуха в основной выработке.

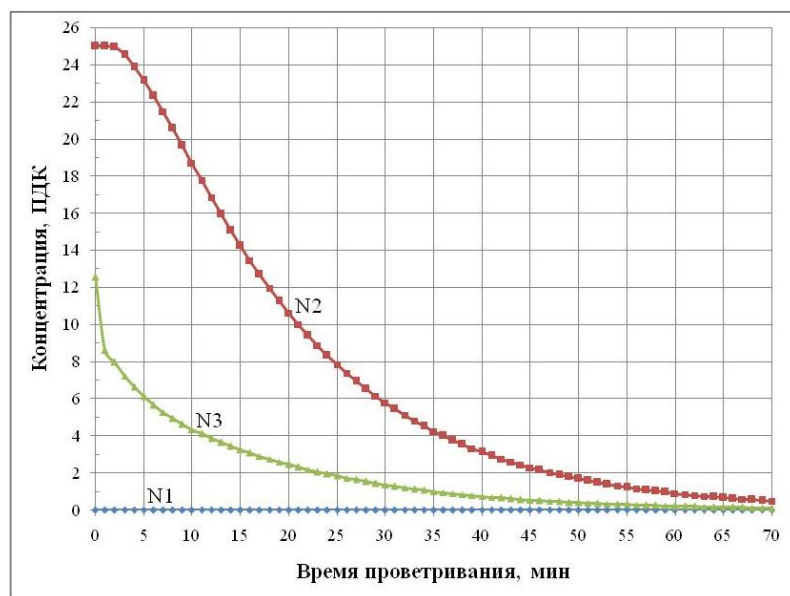
При минимальном расходе воздуха в основной выработке при утечке  $-0,02 \text{ м}^3/\text{с}$  время проветривания сокращается до  $\sim 4,6$  ч, тогда как подсос при том же уровне расхода обеспечивает нормативную чистоту атмосферы в тупиковой выработке уже через  $\sim 2,2$  ч. Дальнейшее увеличение расхода утечки-подсоса до  $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  еще более сокращает время проветривания: в случае утечки до  $\sim 2$  ч, а при подсосе — до  $\sim 1,5$  ч.

При максимальном расходе воздуха в основной выработке при утечке  $-0,02 \text{ м}^3/\text{с}$  время проветривания сокращается с 59,3 до 55,6 мин, тогда как подсос при том же уровне расхода обеспечивает достижение уровня ПДК в тупиковой выработке уже через 16,6 мин. Дальнейший рост расхода утечки-подсоса до  $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  приводит к сокращению времени проветривания: в случае утечки до 47,2 мин, а при подсосе — всего лишь до 16,5 мин. Представляется, что действительно, как это и было отмечено в работах [151, 152] в упрощенной геометрии выработок, подсос воздуха является более эффективным средством сокращения времени проветривания.

Динамика процесса проветривания в точках контроля, расположенных вдоль оси  $Y$  на центральной оси тупиковой выработки с координатами 5 (N3), 15 (N2) и 25 м (N1) вдоль указанной оси (рис. 2.9), представлена на рис. 2.12. На указанных рисунках отображена ситуация, когда расход воздуха в основной выработке равен  $12,5 \text{ м}^3/\text{с}$ , а величина утечки-подсоса составляет  $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ .



*a*



*б*

Рис. 2.12. Динамика концентрации в точках контроля при расходе воздуха в основной выработке  $12,5 \text{ м}^3/\text{с}$ :  
утечка  $-0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  (*a*) и подсос  $+0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  (*б*)

Анализ результатов для всех расходов воздуха в основной выработке показывает, что поведение кривых динамики концентрации в точках контроля N3 и N2 при наличии утечки-подсоса похоже: монотонное снижение, скорость которого определяется расходами воздуха  $Q_{\text{in}}$  и  $Q_{\text{blind}}$ . Максимальное отличие в поведении кривых динамики концентрации имеет место в точке N1. В случае

утечки прогнозируется незначительное (не более 0,4 %) повышение уровня концентрации на начальном этапе проветривания, а затем монотонное снижение уровня концентрации, тогда как при подсосе имеем нулевое значение концентрации (поступает чистый воздух).

Заметим, что в точках контроля в процессе проветривания достижение концентрации уровня ПДК наступает значительно раньше, чем это происходит в других областях моделируемого пространства. Именно поэтому при численном интегрировании нестационарного конвективно-диффузионного уравнения переноса пассивной примеси необходимо отслеживать ту локальную область, в которой достижение уровня ПДК происходит в последнюю очередь.

Во второй серии расчетов по исследованию влияния уровня начального загрязнения атмосферы  $C_0$  тупиковой выработки на время проветривания расчеты выполнены для базовой ситуации ( $Q_{\text{blind}} = 0$ ) при минимальном расходе воздуха в основной выработке. В табл. 2.10 приведены принимаемые в численных экспериментах значения уровня начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки и соответствующие им прогнозные значения времени проветривания.

Таблица 2.10

Прогнозные значения времени проветривания тупиковой выработки  $T$   
в зависимости от уровня начального загрязнения атмосферы  $C_0$   
для базовой ситуации ( $Q_{\text{blind}} = 0$ ) при минимальном расходе воздуха  
в основной выработке 6,25 м<sup>3</sup>/с

|                                   |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Начальное загрязнение $C_0$ , ПДК | 25  | 20  | 15  | 10  | 5   | 2   |
| Время проветривания $T$ , мин     | 479 | 449 | 410 | 356 | 263 | 139 |

График зависимости  $T = f(C_0)$  в рассмотренном интервале начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки для минимального расхода воздуха в основной выработке с максимальным коэффициентом достоверности аппроксимируется логарифмической функцией  $T = 134,51 \ln(C_0) + 46,066$  (мин). Заметим, что именно логарифмическая функция начального уровня загрязнения атмосферы рекомендуется классиками рудничной аэрологии [154–157] при оценке времени проветривания подземных выработок, например, после взрывных работ. Этот факт можно рассматривать дополнительным аргументом объективности результатов и адекватности компьютерной модели. Естественно, что аналогичную процедуру (серии численных экспериментов и обработка результатов расчетов) можно выполнить и для других значений расходов в основной выработке, т. е. выйти на некоторое обобщающее выражение функции нескольких варьируемых переменных, как это сделано в работе [149].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в первом разделе монографии представлено решение актуальной при проектировании горнодобывающих предприятий задачи — оптимизации размещения и параметров перемычек и вентиляторов в сети выработок с целью улучшения проветривания рабочих зон и уменьшения мощности, необходимой для организации проветривания всей вентиляционной системы.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработан метод выбора параметров регуляторов и оптимизации их размещения, основанный на анализе взаимосвязи параметров сети и применении генетического алгоритма, который позволяет решить задачу регулирования воздушных потоков с точностью по расходам воздуха до  $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

2. Усовершенствован алгоритм расчета распределения воздуха в ВС рудника с учетом естественной тяги, утечек воздуха в зонах обрушения и аэродинамических характеристик вентиляторов на основе метода простых итераций и модифицированного метода Ньютона, что позволяет сократить общее количество итераций — до 50, количество итераций расчета контура — до 10 и время счета — до нескольких миллисекунд для сложных сетей выработок с вентиляторами и перемычками с увеличением точности по расходам воздуха до  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  и по депрессии до 0,5 Па.

3. Усовершенствован метод комплексной оценки эффективности проветривания рудника посредством конкретного варианта размещения регуляторов с учетом мощности, затрачиваемой на проветривание и суммарной невязки расходов воздуха по заданным ветвям.

4. Разработанные алгоритмы реализованы в модулях системы автоматизированного проектирования вентиляционных систем (программа VentCAD) и применены для оптимизации количества, размещения и параметров регуляторов в вентиляционных системах рудников Олений ручей и Партомчорр.

Наиболее существенными итогами исследований, которые изложены во втором разделе, являются следующие:

- по результатам натурных испытаний аэродинамики турбулентных воздушных потоков и численного моделирования процесса выноса из выработки газообразных продуктов взрыва при нагнетательном способе проветривания тупиковых выработок после проведения взрывных работ показана возможность увеличения минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб по сравнению с требованиями правил безопасности с соблюдением нормативного времени на проветривание за счет роста расхода воздуха;

- тупиковые выработки длиной более 10 м, в которых ведутся очистные работы, могут проветриваться за счет турбулентной диффузии, при этом время проветривания в зависимости от концентрации газов в выработке может достигать двух и более часов в зависимости от объема подаваемого воздуха в сквозную выработку;

- прогноз времени проветривания тупиковых выработок посредством механизма турбулентной диффузии может быть выполнен на основе предложенного обобщенного аналитического соотношения, аргументами которого являются варьируемые параметры (длина выработки, расход воздуха, начальный уровень загазованности);

- на базе построенных компьютерных моделей (в трехмерной постановке и реальной геометрии) выполнено исследование процесса проветривания тупиковой выработки протяженностью 20 м с учетом утечки-подсоса через зону обрушения и показано, что при длине выработок больше 10 м возможно ее проветривание за счет турбулентной диффузии:

- 1) подсос воздуха по сравнению с утечкой является более эффективным средством сокращения времени проветривания;

- 2) рост расхода воздуха в сквозной выработке сокращает время проветривания до достижения ПДК и при этом расчетные графические зависимости хорошо описываются степенной функцией;

- показано, что прогнозные значения времени проветривания тупикового забоя посредством механизма турбулентной диффузии при фиксированном расходе воздуха в основной выработке при вариации уровня начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки аппроксимируются логарифмической функцией.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гращенко, Н. Ф.* Рудничная вентиляция: справочник / Н. Ф. Гращенко [и др]; под ред. К. З. Ушакова. М.: Недра, 1988. 440 с.
2. *Скочинский, А. А.* Рудничная вентиляция / А. А. Скочинский, В. Б. Комаров. М.; Л.: Углетехиздат, 1949. 443 с.
3. *Цой, С.* Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями / С. Цой, Г. К. Рязанцев. Алма-Ата: Наука, 1968. 257 с.
4. *Воропаев, А. Ф.* Решение сложных диагональных соединений вентиляционной сети / А. Ф. Воропаев // Труды Харьков. гос. ин-та. Харьков: Изд-во ХГИ, 1961. Т. X. С. 67–72.
5. *Попов, А. С.* Проектирование рудничной вентиляции при диагональном соединении проводов воздуха / А. С. Попов. М.: Изд-во Союзугля, 1930. 68 с.
6. *Цой, С.* Основы теории вентиляционных сетей / С. Цой, Е. И. Рогов. Алма-Ата: Наука, 1965. 281 с.
7. *Андряшев, М. М.* Техника расчета водопроводных сетей / М. М. Андряшев. М.: Сов. законодательство, 1932. 65 с.
8. *Белан, А. Е.* Универсальный метод расчета кольцевых вентиляционных сетей / А. Е. Белан // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1964. № 4. С. 69–73.
9. *Белов, В. И.* Новый способ расчета вентиляции диагональных соединений методом последовательных приближений / В. И. Белов // Труды Донец. ин-та. Донецк: Изд-во ДТУ, 1959. Т. XXV, вып. 4. С. 43–50.
10. *Лобачев, В. Г.* Вопросы рационализации водопроводных сетей / В. Г. Лобачев. М.; Л.: ОНТИ, 1936. 52 с.
11. *Бодягин, М. Н.* Проветривание шахт / М. Н. Бодягин. М.: Госгортехиздат, 1961. 231 с.
12. Вентиляция и газопылеподавление на рудниках Казахстана: сб. науч. тр. Алма-Ата: Наука, 1971. 115 с.
13. Вентиляция и очистка воздуха: сб. науч. тр. / НИИРудвентиляция; под ред. В. В. Недина. М.: Недра, 1972. 230 с.
14. *Тян, Р. Б.* Управление проветриванием шахт / Р. Б. Тянь, В.Я. Потемкин. Киев: Наукова думка, 1977. 200 с.
15. *Россочинский, В. И.* Расчет вентиляции для гидроучастков / В. И. Россочинский // Рудничная аэрогазодинамика и безопасность горных работ. М.: Наука, 1964. С. 39–45.
16. *Ильин, В. Г.* Расчет совместной работы насосов водопроводных сетей и резервуаров / В. Г. Ильин. Киев: Госстройиздат УССР, 1963. 136 с.
17. *Абрамов, Ф. А.* Расчет сложных вентиляционных сетей методом касательных гипербола / Ф. А. Абрамов, Р.Б. Тянь, В.Я. Потемкин // Изв. вузов. Горн. журн. 1969. № 12. С. 65–69.
18. *Круглов, Ю. В.* Методы совершенствования современных алгоритмов расчета стационарного воздухораспределения в вентиляционных сетях / Ю. В. Круглов // Материалы ежегод. науч. сессии 2007 ГИ Уро РАН. URL: <http://www.mi-perm.ru/sess2007/sess2007-121.htm> (дата обращения: 20.10.18).

19. Койда, Н. У. Гидравлический расчет водопроводной сети на цифровых автоматических машинах путем нахождения минимума особой функции / Н. У. Койда // Горн. журн. 1965. № 5. С. 32–35.
20. Кузьмин, В. С. Новая методика расчета кольцевых сетей при установившемся течении / В. С. Кузьмин // Электротехника и вычислительная техника в нефтяной, газовой и химической промышленности. М.: Недра, 1965. С. 45–50.
21. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях / А. Г. Евдокимов, А.Д. Тевашев. Харьков: Высш. шк., 1980. 130 с.
22. Багриновский, А. Д. Основы теории распределения воздуха в шахтных вентиляционных сетях / А. Д. Багриновский // Рудничная аэрология: сб. науч. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 5–10.
23. Багриновский, А. Д. Регулирование распределения воздуха в диагональных соединениях выработок / А. Д. Багриновский // Проблемы рудничной аэрологии: сб. науч. тр. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 9–17.
24. Багриновский, А. Д. Топологическая теория шахтных вентиляционных сетей / А. Д. Багриновский // Рудничная аэрогазодинамика и безопасность горных работ: сб. науч. тр. М.: Наука, 1964. С. 3–21.
25. Багриновский, А. Д. Число параметров, характеризующих шахтную вентиляционную сеть / А. Д. Багриновский // Горн. журн. 1961. № 12. С. 18–22.
26. Абрамов, Ф. А. Воздухораспределение в вентиляционных сетях шахт / Ф. А. Абрамов, Р. Б. Тянь, В.Я. Потемкин. Киев: Наукова думка, 1971. 136 с.
27. Цой, С. Синтез оптимальных сетей горных выработок / С. Цой, Г.П. Данилина. Алма-Ата: Наука, 1969. 211 с.
28. Потемкин, В. Я. Метод декомпозиции сетевых законов для оптимизации потокораспределения в шахтных вентиляционных сетях / В. Я. Потемкин, М. П. Комаров // Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1977. С. 50–52.
29. Шепелев, С. Ф. Современный комплекс рудничных воздухорегулирующих средств / С. Ф. Шепелев. Алма-Ата: Наука, 1971. 166 с.
30. Управление вентиляцией и газодинамическими явлениями в шахтах: сб. науч. тр. Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1983. 185 с.
31. Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: тез. докл. М.: Недра, 1976. 148 с.
32. Давыдов, Е. Г. Метод пропорциональных поясных сопротивлений для расчета заданного распределения воздуха в вентиляционных сетях / Е. Г. Давыдов, Р. И. Габайдуллин, А. М. Чеховских // Изв. вузов. Горн. журн. 1992. № 2. С. 74–78.
33. Sarac, S. A combined method for the analysis of mine ventilation network / S. Sarac // J. SAIMM. 2000. No. 4. P. 371–374. URL: [www.saimm.co.za/Journal/v100n06p371.pdf](http://www.saimm.co.za/Journal/v100n06p371.pdf). (дата обращения: 08.03.09).
34. Sarac, S. Mathematical solutions to the multiple-fan ventilation systems / S. Sarac // J. SAIMM, 2000. No. 6. P. 205–210. URL: [www.saimm.co.za/Journal/v100n03p205.pdf](http://www.saimm.co.za/Journal/v100n03p205.pdf). (дата обращения: 12.02.09).
35. Bandyopadhyay, L. K. Development of an expert system for on-line ventilation network analysis and graphic representation of mine ventilation parameters / L. K. Bandyopadhyay // J. SAIMM, 2002. No. 4. P. 125–130. URL: [www.saimm.co.za/Journal/v102n03p125.pdf](http://www.saimm.co.za/Journal/v102n03p125.pdf). (дата обращения: 18.03.09).

36. *Koscic, C.* New ventilation design criteria for underground metal mines based upon the “life-cycle” airflow demand schedule / C. Koscic. URL: <http://hdl.handle.net/2429/12540> (дата обращения: 03.02.09).
37. *Lowndes, I. S.* The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: the influence of coding method and population size / I. S. Lowndes, T. Fogarty, Z. Y. Yang // *Soft Comput*, 2005. Vol. 9. P. 493–506. URL: <http://www.springerlink.com/content/12abw4lukur4vk2lr/> (дата обращения: 14.08.10).
38. *Yang, Z. A.* The optimal design and operation of multi-level fan ventilation systems / Z. A. Yang, I. S. Lowndes, B. Denby // *Proc. of the 7-th International Mine Ventilation Congress*. Cracow: EMAG, 2001. P. 739–745. URL: <http://www.immagine.org/abstract1000.asp?Line1=7600077002> (дата обращения: 12.04.2010).
39. *Zhou, F.-b.* Fuzzy Optimum Selection and Analysis for Optimization and Evaluation of Mine Ventilation Systems / F.-b. Zhou // *J. China university of mining and technology*, 2002. Vol. 31, part 3. P. 262–266. URL: [www.crcnetbase.com/doi/pdf/10.1201/9781439833742.ch41](http://www.crcnetbase.com/doi/pdf/10.1201/9781439833742.ch41) (дата обращения: 25.10.10).
40. *Holland, J. H.* Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence / J. H. Holland. London: Bradford book edition, 1994. 211 p.
41. *Гладков, Л. А.* Биоинспирированные методы в оптимизации / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: Физматлит, 2009. 384 с.
42. *Гладков, Л. А.* Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
43. *Емельянов, В. В.* Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
44. *Back, T.* Evolutionary algorithms in theory and practice / T. Back. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996. 310 p.
45. *Koza, J. R.* Genetic programming / J. R. Koza. Cambridge, Massachusetts; London: A Bradford Book The MIT Press, 1998. 814 p.
46. *The practical handbook of genetic algorithms: complex coding systems* / ed. by Lance D. Chambers. London; N. Y.: CRC Press, 1999. Vol. III. 659 p.
47. *Mitchell, M.* An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. Cambridge, Massachusetts; London, England: A Bradford Book The MIT Press, 1999. 158 p.
48. *Solomatin, D. P.* Genetic and other global optimization algorithms / D. P. Solomatin // *Proc. 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Hydroinformatics*. Copenhagen: Balkena Publ, 1998. P. 1021–1028.
49. *The practical handbook of genetic algorithms: the new frontiers* / ed. by Lance D. Chambers. London, N. Y.: CRC Press, 1995. Vol. I. 421 p.
50. *Пейгин, С. В.* Применение генетических алгоритмов для оптимизации формы тела по тепловому потоку / С. В. Пейгин, Дж. Периаух [Periaux], С. В. Тимоченко // *Математическое моделирование*. 1998. Т. 10, № 9. С. 111–122.
51. *Рутковская, Д. К.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. К. Рутковская, М. Б. Пилиньский, Л. К. Рутковский. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 452 с.

52. The practical handbook of genetic algorithms: applications. / ed. by Lance D. Chambers. London, N. Y.: CRC Press, 2001. 520 p.
53. Haupt, R. L. Practical genetic algorithms / R. L. Haupt, S. E. Haupt. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2004. 253 p.
54. Whitley, D. A. A genetic algorithm tutorial / D. A. Whitley // Comp. science dep. Colorado State University, 1995. 37 p. URL: [www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf](http://www.cs.colostate.edu/~genitor/MiscPubs/tutorial.pdf) (дата обращения: 09.05.10).
55. Батищев, Д. И. Оптимизация нестационарных задач комбинаторного типа с помощью генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, Е.А. Неймарк, Н. В. Старостин // Десятая нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2006: тр. конф.: в 3 т. М.: Физматлит, 2006. Т. 3. С. 976–983.
56. Coley D. A. An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers / D. A. Coley. Singapore; London: World Scientific Publ, 1999. 230 p.
57. Boulos, P. Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms / P. Boulos // Proc. of the AWWA conf. Seattle: WA. 2000. P. 126–131. URL: [www.rbfconsulting.com/papers/genetic\\_algo.pdf](http://www.rbfconsulting.com/papers/genetic_algo.pdf) (дата обращения: 12.04.09).
58. Van Vuuren, S. G. Application of genetic algorithms — determination of the optimal pipe diameters / S. G. Van Vuuren // Water SA., 2002. Vol. 28, No. 2. P. 217–227. URL: <http://www.wrc.org.za/> (дата обращения: 02.12.09).
59. Yang, Z. A. Optimization of subsurface ventilation systems — application of genetic algorithms / Z. A. Yang, I. S. Lowndes, B. Denby // Proc. 27-th Int. Symp. on Comp. Appl. In the Min. Ind. London, 1998. P. 753–764.
60. Цой С. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт / С. Цой. Алма-Ата: Наука, 1975. 335 с.
61. Круглов, Ю. В. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей / Ю. В. Круглов, А. Г. Исаевич, Л. Ю. Левин // Изв. вузов. Горн. журн. 2006. № 5. С. 32–37.
62. Левин, Л. Ю. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность / Л. Ю. Левин, Ю. В. Круглов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2008. № 10. С. 39–48.
63. Казаков, Б. П. Разработка систем нормализации микроклиматических параметров воздуха в горных выработках глубоких рудников Севера / Б. П. Казаков, А. В. Зайцев // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. / Ин-т мерзлотоведения СО РАН. Якутск, 2014. С. 262–266.
64. Левин, Л. Ю. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии / Л. Ю. Левин, М. А. Семин, А. В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 154–161.
65. Казаков, Б. П. К оценке аварийных ситуаций при проектировании рециркуляционных систем / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, Н. А. Трушкова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 132–137.
66. Левин, Л. Ю. Комплексные решения обеспечения безопасных условий труда в условиях теплового режима глубоких рудников Севера / Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев // Горн. информ.-аналит. бюл. 2015. № 03. С. 291–299.

67. Казаков, Б. П. Теория и практика прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников / Б. П. Казаков, Л. Ю. Левин, А. В. Шалимов. М.: Недра, 2016. 244 с.
68. Левин, Л. Ю. Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников / Л. Ю. Левин [и др.] // Горн. журн. 2018. № 8. С. 97–102.
69. Левин, Л. Ю. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках / Л. Ю. Левин, М. А. Семин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 2. С. 120–130.
70. Палеев, Д. Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов, В. Н. Костеренко. М.: Горное дело, 2011. 160 с.
71. Палеев, Д. Ю. Компьютерные технологии для решения задач плана ликвидации аварий / Д. Ю. Палеев [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 1. С. 77–80.
72. Палеев, Д. Ю. Совершенствование подготовки планов ликвидации аварии с использованием программных комплексов «Вентиляция», «Ударная волна» и «Водоснабжение» / Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2013. № ОВ6. С. 227–237.
73. Кобылкин, С. С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: автореферат дис. ... докт. техн. наук. М.: НИТУ «МИСиС», 2018. 42 с.
74. Ли, Бинг-руи Оптимизация шахтной вентиляционной сети методом асимптотического расчета расхода воздуха / Ли Бинг-руи, Иноу Масахиро, Шен Ши-бао // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 1. С. 113–126.
75. Гендлер, С. Г. Обоснование режимов работы автоматизированной системы управления параметрами микроклимата в Северо-Муйском железнодорожном тоннеле / С. Г. Гендлер, В. А. Соколов, Б. Н. Пищик // Горн. информ.-аналит. бюл. 2002. № 8. С. 148–153.
76. Гендлер, С. Г. Исследование вентиляционного и теплового режимов Лысогорского железнодорожного тоннеля / С. Г. Гендлер, В. В. Смирняков, А. Н. Соловьев // Горн. информ.-аналит. бюл. 2006. № S3. С. 133–145.
77. Гендлер, С. Г. Методика определения параметров системы подогрева воздуха в железнодорожных тоннелях, расположенных в суровых климатических условиях / С. Г. Гендлер, С. В. Синявина // Зап. Горн. ин-та. 2017. Т. 224. С. 215–222.
78. Гендлер, С. Г. Обоснование рациональных способов обеспечения воздухом выемочных участков действующих угольных шахт Вьетнама при углублении горных работ / С. Г. Гендлер, Нгуен Тхе Ха // Зап. Горн. ин-та. 2018. Т. 234. С. 652–657.
79. Добров, Р. В. Автоматизированная система управления вентиляцией на горнодобывающих предприятиях / Р. В. Добров. URL: <http://masters.donntu.org/2012/iii/dobrov/library/article3.htm> (дата обращения: 22.10.17).
80. Хохолов, Ю. А. Математическое моделирование тепловых процессов в горных выработках шахт и рудников Севера / Ю. А. Хохолов, Д. Е. Соловьев; отв. ред. А. С. Курилко; Рос. акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т горного дела Севера им. Н. В. Черского. Новосибирск: Гео, 2013. 185 с.

81. *Кобылкин, С. С.* 3-D-моделирование физических процессов при авариях на горных предприятиях / С. С. Кобылкин, А. С. Кобылкин // Сборник тезисов докладов VIII Междунар. горноспасательной конф. IMRB-2017. М.: МЧС, 2017. 34 с.
82. *Widzyk-Capehart, E.* Agnew gold mine expansion mine ventilation evaluation using Ventsim / E. Widzyk-Capehart // ICEE 2001: 7<sup>th</sup> International Mine Ventilation Congress, June 17–22, 2001. Cracow, Poland, 2001. P. 345–352.
83. VentSim Mine Ventilation. URL: [www.ventsim.com](http://www.ventsim.com) (дата обращения: 20.04.11).
84. Ventilation control of self-heating in retreating longwall coal mines / J. Banik, M. J. McPherson, E. Topuz // SME: Proc. of the 7-th US Mine Ventilation Symposium. 1995. Ch. 53. P. 16–23.
85. *Wallace, K. G.* General operational characteristics and industry practices of mine ventilation systems / K. G. Wallace // ICEE 2001: 7<sup>th</sup> International Mine Ventilation Congress, June 17–22, 2001. Cracow, Poland, 2001. P. 229–234.
86. Manual Vnetpc. URL: <https://ru.scribd.com/document/252906316/Manual-Vnetpc> (дата обращения: 12.08.18).
87. *Marx, W. M.* Vuma (Ventilation of Underground Mine Atmospheres) — a mine ventilation and cooling network simulation tool / W. M. Marx [et al.] // ICEE 2001: 7<sup>th</sup> International Mine Ventilation Congress, June 17–22, 2001. Cracow, Poland, 2001. P. 317–323.
88. VUMA Software for mine ventilation, cooling and environmental control. URL: <https://www.vuma3d.com/> VUMA Software (дата обращения: 25.05.18).
89. Автоматизированный программный комплекс моделирования системы контроля и управления вентиляцией на горных предприятиях. URL: <http://miningonfo.kz/?q=ru/node/720> (дата обращения: 07.04.13).
90. Вентиляция 2 — Шахтэксперт-Системы/ URL: <https://minesoft.ru/cooling>. (дата обращения: 17.02.18).
91. *Трофимов, В. А.* Повышение устойчивости проветривания при пожаре поезда в тоннеле метрополитена / В. А. Трофимов, В. А. Гулаков // Известия ДГУ. 2001. № 2. С. 23–24.
92. IRS Вентиляция — ПЛАН. URL: <http://intersoft.ukrbiz.net/program.html> (дата обращения: 18.03.18).
93. *Назаренко, В. И.* Программная система РЕВОД для расчета воздухо- и газораспределения в шахтной вентиляционной сети / В. И. Назаренко, Н. С. Почтаренко, И. А. Турута // Известия ДГУ. 1999. № 1. С. 13–16.
94. Программная система РЕВОД. URL: <http://ea.donntu.org:8080/bitstream/123456789/2664/1/REVOD.pdf> (дата обращения: 19.06.17).
95. *Кравченко, Н. М.* Решение задач рудничной вентиляции в нормальных и аварийных условиях / Н. М. Кравченко // Уголь Украины. 2002. № 6. С. 34–38.
96. *Кравченко, М. В.* Опыт внедрения программного комплекса «Вентиляция шахт» / М. В. Кравченко, Н. М. Кравченко // Уголь Украины. 2003. № 2. С. 26–28.
97. *Кравченко, М. В.* Решение задач техносферной безопасности в компьютерной системе «Вентиляция шахт» / М. В. Кравченко, Н. М. Кравченко, П. С. Пашковский // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. конф. (Кемерово, 22–23 ноября 2017 г.) / Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Г. Горбачева. Кемерово:

- КузГТУ, 2017. URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2017/bgd2017/pages/Articles/117.pdf> (дата обращения: 12.06.18).
98. Гипроуголь — вентиляция шахт. URL: <http://www.giprougol.ru/technologies/software/ventsh/> (дата обращения: 20.04.11).
99. Вентиляция 2.0. URL: <http://www.giprougol.ru/vent/paleev.htm> (дата обращения: 28.09.17).
100. Казаков, Б. П. Разработка программно-вычислительного комплекса «Аэросеть» для расчета вентиляционных шахт и рудников / Б. П. Казаков [и др.] // Горн. информ.-аналит. бюл. 2006. № S3. С. 21–33.
101. Аналитический комплекс «АЭРОСЕТЬ»: Программа для моделирования и расчетов вентиляционных сетей. URL: [http://www.mi-perm.ru/solution/pr?show\\_id=16](http://www.mi-perm.ru/solution/pr?show_id=16) (дата обращения: 28.09.17).
102. Аэросеть — решение проблем рудничной вентиляции. URL: [aeroset.net](http://aeroset.net) (дата обращения: 28.09.17).
103. Осинцева, А. В. Обоснование эффективных вариантов регулирования вентиляции подземного рудника и оптимизации параметров регуляторов посредством генетического алгоритма / А. В. Осинцева, С. А. Козырев // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14, № 3. С. 530–534.
104. Осинцева, А. В. Оптимизация количества и мест расположения регуляторов в вентиляционной системе рудника для обеспечения заданного распределения воздуха / А. В. Осинцева, В. В. Осинцев, С. А. Козырев // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты; СПб.: Реноме, 2009. С. 233–237.
105. Осинцева, А. В. Анализ вариантов регулирования распределения воздуха в подземном руднике / А. В. Осинцева // Добыча и переработка руд в условиях ухудшения их залегания и снижения качества: тез. докл. науч. школы молодых ученых и специалистов / Горн. ин-т КНЦ РАН. Апатиты, 2009. С. 19–20.
106. Осинцева, А. В. Оптимизация регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника / А. В. Осинцева // Сборник трудов XI Межрегиональной науч.-практ. конф. КФ ПетрГУ. Апатиты, 2008. С. 90–91.
107. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом // ПБО 3-553-03. СПб., 2003. 104 с.
108. Курейчик, В. М. Поисковая адаптация: теория и практика / В. М. Курейчик, Б. К. Лебедев, О. К. Лебедев. М.: Физматлит, 2006. 272 с.
109. Аналитические технологии для прогнозирования и анализа данных // НейроПроект. 1999–2005. URL: <http://www.neuroproject.ru/genealg.php>. (дата обращения: 20.10.09).
110. Пигида, Г. Л. Анализ совместной работы шахтных вентиляторов / Г. Л. Пигида. М.: Недра, 1976. 206 с.
111. Слепых, В. Ф. Прогнозный расчет вентиляционных систем рудников / В. Ф. Слепых, Е. В. Вязниковцев. Алма-Ата: Наука, 1973. 189 с.
112. Вассерман, А. Д. Методы оценки вентиляционных систем рудников / А. Д. Вассерман. Л.: Наука, 1974. 109 с.

113. *Шаболдо, П. И.* Контроль и очистка воздушной среды в сети горных выработок: монография / П. И. Шаболдо [и др.]; под ред. А. Д. Вассермана. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. 100 с.
114. *Красноштейн, А. Е.* Аэрогазодинамика подземных рудников большой единичной мощности / А. Е. Красноштейн // Горные науки на рубеже XXI века. Пермь: Изд-во УрО РАН, 1998. С. 223–246.
115. *Алехичев, С. П.* Естественная тяга и тепловой режим рудников / С. П. Алехичев, Г. В. Калабин. Л.: Наука, 1974. 110 с.
116. *Вассерман, А. Д.* Методические указания по технико-экономической оценке и расчету оптимальных параметров рудничных тепловентиляционных систем по принципам безопасности и комфортности / А. Д. Вассерман, Л. И. Иванова. Апатиты: КФ АН СССР, 1981. 84 с.
117. *Вассерман, А. Д.* Расчет депрессии естественной тяги в условиях горной местности / А. Д. Вассерман, М. А. Резников // Шахтное строительство. 1984. № 12. С. 10–11.
118. *Осинцев, В. В.* Система автоматизированных расчетов (САПР ВС) при проектировании вентиляции подземного рудника / В. В. Осинцев [и др.] // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты; СПб.: Реноме, 2009. С. 229–232.
119. *Вассерман, А. Д.* Методические основы проектирования вентиляционных систем рудников на базе информационной технологии / А. Д. Вассерман, В. С. Романов, А. Ф. Буянов // Информационные технологии в горном деле. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. Ч. 2. С. 67–109.
120. *Иванова, Л. И.* Анализ и обоснование выбора численного метода для решения вентиляционных задач / Л. И. Иванова // Эффективность вентиляционных систем подземных рудников. Апатиты: КФ АН СССР, 1974. С. 88–96.
121. *Медведев, И. И.* Проветривание калийных рудников / И. И. Медведев. М.: Недра, 1970. 207 с.
122. *Осинцев, В. В.* Автоматизированное проектирование и организация проветривания рудника / В. В. Осинцев, А. Д. Вассерман, С. А. Козырев // Горное дело в Арктике: сб. науч. тр. СПб.: Иван Федоров, 2005. С. 169–176.
123. *Осинцев, В. В.* Программно-алгоритмическое обеспечение блока «САПР ВС рудника» в системе АИС горного предприятия / В. В. Осинцев, А. Д. Вассерман // Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства Северо-Запада России: материалы междунар. конф. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. Ч. 2. С. 130–136.
124. *Козырев, С. А.* Автоматизация проектирования вентиляции подземного рудника / С. А. Козырев, А. В. Осинцева // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 677–682.
125. *Козырев, С. А.* Комплекс программ для автоматизированных расчетов (САПР ВС) при проектировании и организации вентиляции подземных рудников / С. А. Козырев [и др.] // Инновационные технологии и современные методы инженерного обеспечения горно-обогатительного производства: сборник инновационных проектов. СПб.; Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 14–16.
126. *Алехичев, С. П.* Воздухораспределение в рудниках с зонами обрушения / С. П. Алехичев, А. Д. Вассерман. Л.: Наука, 1973. 84 с.

127. *Алехичев, С. П.*, Методические указания по расчету вентиляции при проектировании нагорных рудников с большими площадями зон обрушения / С. П. Алехичев, А. Д. Вассерман. Апатиты: КФАН СССР, 1968. 56 с.
128. *Мустель, П. И.* Рудничная аэрология / П. И. Мустель. М.: Недра, 1970. 215 с.
129. *Кирин, Б. Ф.* Рудничная и промышленная аэрология / Б. Ф. Кирин, К. З. Ушаков. М.: Недра, 1983. 256 с.
130. *Вассерман, А. Д.* Проектные обоснования параметров вентиляции рудников и подземных сооружений / А. Д. Вассерман. Л.: Наука, 1988. 153 с.
131. *Гуменюк, Т. Е.* Исследование проветривания подземными вспомогательными вентиляторами без перемычки и методика их расчета и выбора / Т. Е. Гуменюк // Труды Всесоюз. совещ. по проветриванию рудников и обеспыливанию рудничного воздуха. Алма-Ата: АН КазССР, 1962. С. 93–98.
132. *Медведев, И. И.* Методика расчета проветривания выработок с использованием вентилятора-эжектора / И. И. Медведев // Тепловые и механические процессы при разработке полезных ископаемых: сб. науч. тр. М.: Наука, 1965. С. 88–94.
133. *Бак, О.* Проектирование и расчет вентиляторов / О. Бак. М.: Углетехиздат, 1958. 363 с.
134. *Жумахов, И. М.* Насосы, вентиляторы и компрессоры / И. М. Жумахов. М.: Углетехиздат, 1958. 598 с.
135. *Луговский, С. И.* Проветривание глубоких рудников / С. И. Луговский. М.: Госгортехиздат, 1962. 323 с.
136. *Мясников, А. А.* Повышение эффективности и безопасности горных работ / А. А. Мясников, А. Ф. Павлов, В. А. Бонецкий. М.: Недра, 1979. 216 с.
137. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». М.: НИИЦ «Недра-XXI», 2015. 160 с.
138. *Батулин, В. В.* Основы промышленной вентиляции / В. В. Батулин. М.: Профиздат, 1965. 460 с.
139. *Бурчаков, А. С.* Основные характеристики турбулентных свободных струй. Рудничная аэрология / А. С. Бурчаков, П. И. Мустель, К. З. Ушаков. М.: Недра, 1971. 378 с.
140. *Паршин, Я. Д.* О некоторых физических явлениях при вымывании вредностей из тупиковых выработок / Я. Д. Паршин // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. Апатиты: КФАН СССР, 1977. С. 81–83.
141. *Мостепанов, Ю. Б.* Исследование дальноточности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки / Ю. Б. Мостепанов // Изв. вузов. Горн. журн. 1978. № 11. С. 47–50.
142. *Талиев, В. Н.* Аэродинамика вентиляции / В. Н. Талиев. М.: Стройиздат, 1979. 162 с.
143. Рекомендации по расчету и организации проветривания подготовительных и очистных выработок при системе разработки с торцовым выпуском руды на рудниках ПО «Апатит» / Рос. акад. наук, Кол. науч. центр, Горный ин-т; сост. А. Д. Вассерман, В. С. Романов. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 32 с.
144. *Бакланов, А. А.* Численное моделирование в рудничной аэрологии / А. А. Бакланов. Апатиты: КФАН СССР, 1988. 200 с.

145. *Калабин, Г. В.* Метод расчета аэрогазодинамики плоских камерообразных выработок на основе математического моделирования / Г. В. Калабин, А. А. Бакланов, П. В. Амосов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 1. С. 74–88.
146. *Козырев, С. А.* Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 10. С. 79–83.
147. *Козырев, С. А.* Математическое моделирование проветривания тупиковых выработок при взрывных работах с использованием CFD-моделей / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Аэрология и безопасность горных предприятий: сб. науч. тр. М.: Горное дело, 2013. Вып. 1. С. 23–29.
148. *Козырев, С. А.* Применение CFD-моделей при решении задач рудничной аэрологии / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2014. № 8. С. 204–211.
149. *Козырев, С. А.* Методический подход к оценке времени проветривания тупиковых выработок на базе трехмерного численного моделирования / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1–1. С. 5–12.
150. *Алехичев, С. П.* Аэродинамика зон обрушения и расчет блоковых утечек воздуха / С. П. Алехичев, Л. А. Пучков. Л.: Наука, 1968. 67 с.
151. *Козырев, С. А.* Численное моделирование процесса проветривания одиночной тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 291–294.
152. *Kozyrev, S.* Numerical modeling of blind excavation ventilation taking into account failure zone / S. Kozyrev, P. Amosov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17, No. 13. P. 591–598.
153. *Козырев, С. А.* Исследование процесса проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения / С. А. Козырев, П. В. Амосов // Изв. вузов. Горн. журн. 2018. № 8. С. 125–134.
154. *Дуганов, Г. В.* Проветривание тупиковых выработок большой длины / Г. В. Дуганов [и др.]. М.: Недра, 1968. 75 с.
155. *Комаров, В. Б.* Рудничная вентиляция / В. Б. Комаров, Ш. Х. Килькеев. М.: Недра, 1969. 416 с.
156. *Бурчаков, А. С.* Рудничная аэрология / А. С. Бурчаков, П. И. Мустель, К. З. Ушаков. М.: Недра, 1971. 376 с.
157. *Ушаков, К. З.* Рудничная аэрология / К. З. Ушаков, А. С. Бурчаков, И. И. Медведев. М.: Недра, 1978. 440 с.



**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ**  
РОССИЯ, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 24

ISBN 978-5-91137-400-6

