

4839851

ПОСТНИКОВА Мария Юрьевна

**ВЛИЯНИЕ ВЫРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВ
НА АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКОВ**

Специальность 25.00.20 Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

03 МАР 2011

Тула 2011

Диссертация подготовлена в ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» на кафедре геотехнологий и строительства подземных сооружений.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
КАЧУРИН Николай Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
ЗЕМСКОВ Александр Николаевич,

кандидат технических наук
ИСАЕВИЧ Алексей Геннадьевич.

Ведущая организация: ФГУП «ГИПРОЦВЕТМЕТ».

Защита диссертации состоится «18» марта 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.271.04 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 90, ауд. 220, 6 уч. корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Автореферат разослан «14» марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Б. Копылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с развитием техники и технологии добычи полезного ископаемого увеличивается сечение проводимых горных выработок и добычных камер, увеличиваются размеры шахтных полей и количество добычных участков, что было связано с увеличением добычи полезного ископаемого. В связи с этим появился большой объем пустот в выработанных пространствах. Эти пустоты представляют пути движения воздуха, а поэтому становятся путями утечек или, наоборот, притечек воздуха, что затрудняет управление вентиляционными сетями. В любом случае выработанные пространства, как пути движения воздуха, являются частью вентиляционных сетей (расчетных моделей), в которых их необходимо как-то представлять, чтобы иметь возможность рассчитывать вентиляционные сети любой сложности.

Но выработанные пространства играют еще одну роль в вентиляционных сетях. К примеру, в Тульской области в руднике ОАО «KNAUF ГИПС Новомосковск» суммарный объем пустот выработанных пространств составляет более 36 млн м³. Эти выработанные пространства представляют собой множество камер большого сечения (до 100 м²), которые невозможно изолировать. Эти пространства могут вмещать огромные объемы воздуха при работе вентилятора главного проветривания (ВГП) на нагнетание или отдавать воздух при работе ВГП на всасывание.

В аварийной ситуации (в основном, пожар) при изменении режима работы ВГП (переход от нагнетательного способа проветривания к всасывающему, от нагнетательного способа к нулевой вентиляции и наоборот) в первую очередь заполняются воздухом или отдают воздух выработанные пространства, вследствие чего изменение режима проветривания шахты (рудника) растягивается на длительный период.

В настоящее время на каждую аварийную ситуацию в шахте составляются планы ликвидации аварий (ПЛА). При разработке мероприятий по ликвидации последствий аварии и эвакуации горнорабочих из аварийных участков, которые закладываются в позициях ПЛА, исходят из того, что изменение режима вентиляции шахты происходит мгновенно с момента изменения режима работы ВГП. Однако наличие выработанных пространств затягивает процесс изменения режима вентиляции и условия безопасной эвакуации рабочих из аварийных участков могут не состояться. В этих случаях эвакуация рабочих по обозначенным эвакуационным путям может стать не только затруднительной, но и невозможной.

Например, при возникновении пожара в блоковом конвейерном штреке рудника БКПРУ-3 (г. Березники Пермского края) в 1980 г. наличие выработанных пространств привело к заполнению пожарными газами всей панели (участка), в результате чего погибло 6 человек. Другой пример – пожар на шахте «Южнодонбасская» № 1 объединения «Донецкуголь» 29 июня 1991

года в полевом конвейерном штреке горизонта -335 м. Маршрут движения людей на случай аварии не был детально проработан и отсутствовал прогноз газовой обстановки на момент возникновения пожара. В результате этой аварии погибло 32 человека.

Поэтому проблема влияния выработанных пространств на аэрогазодинамические процессы при аварийных режимах вентиляции рудников является весьма актуальной.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с тематическим планом НИР Научно-образовательного центра по проблемам рационального природопользования при комплексном освоении минерально-сырьевых ресурсов Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2010 годы)» (рег. номер 2.2.1.1/3942) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт № 02.740.11.0319).

Целью работы является установление новых и уточнение существующих закономерностей аэрогазодинамических процессов в горных выработках и выработанных пространствах рудников и угольных шахт, обусловленных реверсированием вентиляторов главного проветривания, для совершенствования методики прогнозирования газовых ситуаций при аварийных режимах вентиляции, что повысит эффективность практической реализации планов ликвидации аварий.

Идея работы заключалась в том, что повышение эффективности практической реализации для планов ликвидации аварий обеспечивается прогнозированием газовых ситуаций на очистных и подготовительных участках с учетом процессов диффузионного переноса газовых примесей в рудничной атмосфере и релаксации давления в вентиляционных сетях, обусловленных аварийными режимами вентиляции.

Основные научные положения, сформулированные в работе, заключаются в следующем:

выработанные пространства шахт и рудников влияют на длительность перехода на реверсивный или нулевой режим вентиляции при возникновении аварий, создавая аэродинамические переходные процессы в вентиляционных сетях;

переходный процесс в ветвях вентиляционной сети после реверсирования ВГП может длиться от 20 до 90 мин, а скорость изменения давления при этом будет убывать пропорционально отношению разности давлений между конечным и текущим значением к периоду релаксации давления;

газовая ситуация в любой точке вентиляционной сети является следствием нестационарного газообмена между источниками газовой выделений и вентиляционным потоком и моделируется уравнениями диффузионного переноса для расчетных значений расхода воздуха в ветвях;

для аналитического описания характеристики вентилятора по данным заводских испытаний и данным хотя бы одного измерения действительного

режима работы главной вентиляторной установки целесообразно использовать квадратный трехчлен.

Научная новизна работы заключается в том, что выработанные пространства большого объема рассматриваются как источники поглощения или выделения больших объемов воздуха, влияющие на режимы работы ВГП и аварийные режимы вентиляции шахт и рудников. Предложено формулировать позиции в планах ликвидации аварий (при пожарах) с учетом той реальной обстановки, которая сложится в переходный период осуществления аварийной вентиляции в первые минуты (около 20 минут), когда действия работников шахты и спасательных служб выполняются точно так, как предусматривают планы ликвидации аварий.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием теоретических выводов фундаментальным законам физики; удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования и промышленных экспериментов (отклонение не превышало 20%); представительным объемом данных экспериментальных измерений (в процессе газовойдушных и депрессионных съемок проведено более 10000 измерений); положительными результатами практического использования в ПЛА предложенных сценариев развития аэрогазодинамических ситуаций при аварийной вентиляции.

Научная значимость работы заключается в систематизации, обобщении и развитии научных исследований в области вентиляции шахт и рудников, рудничной аэрогазодинамики и совершенствовании методологии управления аварийными вентиляционными режимами для обеспечения безопасных путей эвакуации рабочих из аварийных участков шахт и рудников.

Практическое значение работы состоит в том, что полученные научные результаты позволяют оценить аэрогазодинамическую обстановку при аварии и длительность переходного периода аварийной вентиляции, выбрать наиболее рациональный аварийный режим и наметить наиболее безопасные пути эвакуации рабочих из аварийных участков. Практические рекомендации, сформулированные в диссертации, позволяют составлять позиции планов ликвидации аварий с учетом возможных газовых ситуаций, возникающих при аварии, что повышает уровень безопасности при эвакуации подземных горнорабочих.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты исследований доведены до промышленного применения на калийных рудниках ОАО «Сильвинит» (отчеты: «Поддержка и корректировка графической информационной системы расчета параметров вентиляции, связанной с электронным планом горных работ для СКРУ-1, 2, 3» - договор 2006/30; «Разработать мероприятия по приведению в рабочее состояние вентиляционных систем панелей рудника СКРУ-2» - договор 2007/25). Основные научные результаты используются в курсе «Аэрология горных предприятий» на кафедре Г и СПС ТулГУ.

Апробация работы. Научные положения и практические рекомендации диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений ТулГУ (г. Тула, 2009 – 2010 гг.); ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2009 – 2010 гг.); Международной конференции, посвященной 75-летию со дня рождения д-ра техн.наук, проф. И.И.Медведева (г. Кунгур Пермского края, июнь 2004 г.); симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, январь – февраль 2005 – 2009 гг.); Уральской горнопромышленной декаде (г. Екатеринбург, 10-13 апреля 2006 г. и 18-19 апреля 2007 г.); 3-й Международной научно-практической конференции «Технологии ведения горных работ и производство машин и механизмов для горнодобывающей промышленности» (г. Пермь, 10-12 сентября 2007 г.); Всероссийской конференции «Проблемы рудничной аэрологии и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых» (г. Пермь, 24-27 октября 2007 г.); Международном форуме молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 23-25 апреля 2008 г.); IV Международной научно-практической конференции «Технология ведения горных работ и производство техники для горнодобывающей промышленности» (г. Пермь, 8-10 октября 2008 г.); 5-й и 6-й Международной научно-практической конференции «Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование» (г. Пермь, 2009 – 2010 гг.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 15 работ.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 191 страницах машинописного текста, состоит из 5 разделов, содержит 11 таблиц, 50 рисунков, список литературы из 153 наименований, приложение.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Безопасность жизнедеятельности и рудничной вентиляции» и «Электрификация и автоматизация горных предприятий» Пермского государственного технического университета за постоянную поддержку и методическую помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Современные методы прогноза и управления опасными газовыми ситуациями на предприятиях минерально-сырьевого комплекса являются результатом исследований, выполненных ИПКОН РАН, ВостНИИ, ИГД им. А.А. Скочинского, Горным институтом Уральского отделения РАН, МГТУ, Санкт-Петербургским горным институтом, ПГТУ, ТулГУ и др. Большой вклад в решение проблемы внесли академик РАН К.Н. Трубецкой, чл.-корреспонденты РАН Д.А. Рубан, Д.Р. Каплунов, А.Е. Красноштейн, а также Ф.А. Абрамов, А.А. Айруни, К.К. Бусыгин, Ю.Ф. Васючков, Ф.С. Клебанов, А.Д. Кизряков, О.И. Касимов, С.П. Казаков, Н.М. Качурин, А.Д. Климанов,

Р.А. Ковалев, В.Б. Комаров, Н.Н. Мохирев, А.А. Мясников, Н.В. Ножкин, А.Э. Петросян, В.С. Пак, Л.А. Пучков, И.В. Сергеев, Э.М. Соколов, М.Б. Сулла, Н.И. Устинов, К.З. Ушаков, В.А. Фатуев и др. Анализ основных научных и практических результатов по прогнозу и управлению опасными газовыми ситуациями на горных предприятиях, разрабатывающих месторождения полезных ископаемых подземным способом, позволил сформулировать цель и идею работы, а также определить направление дальнейших исследований.

Цель и идея работы, а также современное состояние знаний по рассматриваемой проблеме обусловили необходимость постановки и решения следующих задач исследований.

1. Разработать методику натурных исследований аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях рудников с большими объемами выработанных пространств и провести серию натурных экспериментов.

2. Усовершенствовать физическую модель и математическое описание процесса диффузии примесей в вентиляционной сети очистных и подготовительных участков, разработать алгоритм прогноза газовых ситуаций и провести вычислительные эксперименты.

3. Обосновать физическую модель и разработать математическое описание переходного процесса изменения давления воздуха в вентиляционной сети при реверсировании вентилятора главного проветривания.

4. Оценить параметры процесса релаксации давления воздуха в вентиляционной сети при реверсировании вентилятора главного проветривания для калийных и гипсовых рудников.

5. Разработать методику расчета воздухораспределения в вентиляционной сети в течение переходного периода после реверсирования вентилятора главного проветривания процесс и обосновать практические рекомендации по совершенствованию методики разработки ПЛА.

Натурные наблюдения, выполненные на калийных и гипсовых рудниках, позволили рассмотреть различные классификационные формы выработанных пространств. Предложенные формы представления выработанных пространств при расчете вентиляционной сети позволили классифицировать образующиеся пустоты. Был разработан алгоритм решения задачи воздухораспределения в вентиляционной сети с выработанными пространствами, которые в различных ситуациях аварийного проветривания рудника могут быть представлены условными источниками тяги. Теоретически рассмотрена ситуация, когда после длительного останова вводится в работу ВГП (на рудниках с двухсменным режимом работы), и рассмотрен алгоритм решения задачи воздухораспределения в вентиляционной сети с полыми открытыми выработанными пространствами при остановке ВГП. Это позволило обосновать механизм их влияния на вентиляционную обстановку в руднике, определить период действия выработанных пространств и разработать алгоритм расчета вентиляционной сети с полыми открытыми выработанными пространствами

при реверсии общерудничной вентиляционной струи с помощью ВГП. Также обоснован механизм влияния выработанных пространств на данный аварийный процесс; выведена формула определения величины избыточного воздуха, который может размещаться в пустотах выработанного пространства неизменного объема под воздействием внешнего давления; определена инерционность вентиляционной системы.

При расчете вентиляционных сетей с целью получения воздухораспределения для обычного установившегося проветривания представление выработанных пространств ветвями с входом и выходом воздуха из них является вполне закономерным. Однако те же расчеты, но выполняемые для переходного процесса от нормального проветривания к аварийному режиму уже невозможны, т.к. многие закономерности (1-й и 2-й законы вентиляционных сетей) нарушаются. Следовательно, представлять выработанные пространства обычными ветвями невозможно. Для решения задачи воздухораспределения в вентиляционных сетях в переходный период выработанные пространства следует представлять ветвями с одним узлом, в которых движение воздуха разнонаправлено и имеет ограничение.

Алгоритм расчета вентиляционной сети с выработанными пространствами, которые в различных ситуациях аварийного проветривания рудника могут быть представлены условными источниками тяги, складывается из следующих этапов:

1. Главная вентиляторная установка мгновенно (для упрощения начальных выводов) переводится в режим аварийного реверсирования вентиляционной струи в руднике (шахте). В руднике имеются выработки (ветви), в которых в данное мгновение сохраняется давление (депрессия), равная $h_{вп}$. За счет этого остаточного давления объем пустот в данной выработке - выработанном пространстве (ВП) V может разместить Q объемов воздуха. На рис. 1 показан переход от нормального всасывающего (рис.1, а, б) проветривания рудника на аварийный нагнетательный (рис.1, в, г);

2. Поскольку при нормальном всасывающем проветривании в ветви 3 создано разрежение, то в момент реверсии за счет этого разрежения со стороны воздухоподающего ствола воздух продолжает поступать в том же направлении. Со стороны вентиляционного ствола потоки воздуха реверсируются вентиляторной установкой. Суммарные потоки воздуха, втекающие в ветвь 3, $Q_3 = Q_2 + Q_4$ и $Q_3 = Q_9 + Q_{10}$.

3. Поскольку в ветви 3 разрежение, то она «втягивает в себя» воздух, т.е. действует как источник тяги. Заменим ветвь 3 на источник тяги с первоначальной депрессией $h_{вп}$. Но тогда окажется, что условный источник тяги в ветви 3 и главная вентиляторная установка в ветви 6 работают совместно в одном направлении.

4. В следующее мгновение, т.е. через весьма малый промежуток времени с момента реверсии, выработанные пространства будут иметь емкость по

воздуху или же смогут разместить не Q объемов, а $Q_1 = Q - Q_2 - Q_4$ (рис. 1, *в*). Точно так же $Q_1 = Q - Q_9 - Q_{10}$ (рис. 1, *з*). В связи с этим разрежение в них уменьшится с $h_{вп}$ до $h_{вп.1}$. Потери депрессии в ветвях вентиляционной сети в связи с изменением $h_{вп}$ до $h_{вп.1}$ должны измениться так же, как и режим ВГП. Этот процесс будет протекать до тех пор, пока в ветви 3 разрежение не станет равным нулю.

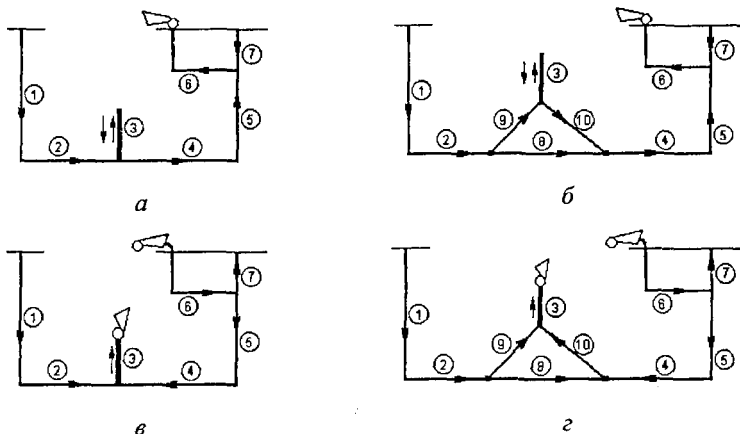


Рис. 1. Трансформация выработанных пространств в виде ветви 3 в вентиляционной сети рудника

5. Однако ВГП продолжает работать, следовательно, в руднике и особенно в выработанном пространстве начинает создаваться избыточное давление. Выработанные пространства по-прежнему должны наполняться воздухом, но уже за счет сжатия его избыточным давлением, т.е. в выработанных пространствах также растет давление. За счет этого давления потоки воздуха в ветвях 1 и 2 реверсируются. Теперь выработанные пространства наполняются воздухом за счет разности потоков $Q_4 - Q_2$ на рис. 1, *в* и $Q_9 - Q_{10}$ (рис. 1, *з*).

6. При определенном максимальном давлении, которое может создать ВГП в данной точке вентиляционной сети (на рис. 1, *а* в точке соединения ветвей 2, 3, и 4, на рис. 1, *б* в точке соединения ветвей 9, 3 и 10), выработанные пространства полностью наполнятся воздухом. В этот момент потоки воздуха в ветвях до выработанных пространств станут равными потокам воздуха в ветвях за выработанными пространствами, т.е. $Q_4 = Q_2$ и $Q_9 = Q_{10}$.

Таким образом, в выработанных пространствах избыточное давление возрастает от нуля до какой-то максимальной величины, причем это давление направлено навстречу направлению работы ВГП. Это явление может быть

интерпретировано действием условного источника тяги в ветви 3, направленного против действия ВГП. Вентиляционные сети на рис. 1, в, г в этом случае предстанут в виде, показанном на рис. 2, а, б.

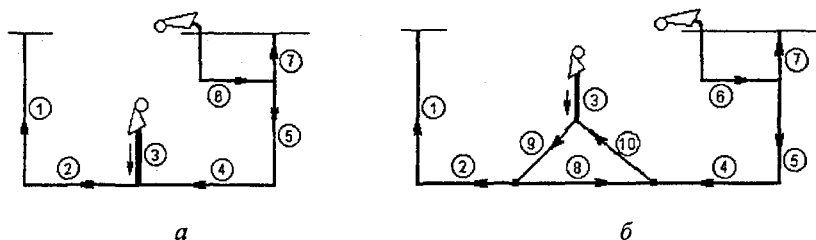


Рис. 2. Вентиляционные сети при наполнении выработанных пространств воздухом за счет избыточного давления

Таким образом, в переходный период проветривания рудника действие выработанных пространств может быть представлено работой условных источников тяги, работающих совместно с ВГП. Расчет таких вентиляционных систем с множеством источников тяги существующими методами не представляет труда.

Экспериментальные наблюдения в натуральных условиях показали, что реверсирование ВГП приводит к резкому изменению давления воздуха в шахтной вентиляционной сети (ШВС). Переход от всасывающего способа проветривания к нагнетательному способу увеличит давление воздуха в ШВС, а переход от нагнетательного способа проветривания к всасывающему способу снизит его.

Аналогичное изменение давления воздуха происходит и при переходе на нулевой режим вентиляции. Однако предполагаемого ступенчатого изменения давления воздуха в ШВС не происходит, а возникает некоторое запаздывание, и реверс можно считать завершенным лишь по истечению 10 – 15 мин после реверсирования ВГП.

Натурные наблюдения показывают, что длительность переходного процесса на калийных рудниках существенно зависит от объема выработанных пространств. При этом скорость изменения давления воздуха пропорциональна разности между конечным и текущим значениями давления. То есть возникает релаксация давления воздуха в ШВС, которая проявляется как переходный процесс от начального давления к его конечному значению.

Следовательно, можно записать, что

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p_{\infty} - p}{t_r}, \quad (1)$$

где p – текущее значение давления воздуха в ШВС; p_{∞} – конечное значение давления воздуха в ШВС после реверсирования ВГП; t – текущее время про-

цесс релаксации давления $p(t)$; t_r – период релаксации, численно равный времени, в течение которого давление воздуха в ШВС уменьшается в e раз.

Конечное значение давления воздуха в ШВС после реверсирования ВГП можно определить следующим образом:

$$p_{\infty} = \begin{cases} p_{\infty}^{(+)} & \text{при повышении давления воздуха в ШВС,} \\ p_{\infty}^{(-)} & \text{при уменьшении давления воздуха в ШВС.} \end{cases} \quad (2)$$

Решение уравнения (1) для начального условия $p(0) = p_0 = \text{const}$ получено в следующем виде:

$$p(t) = p_{\infty} - (p_{\infty} - p_0) \exp(-t/t_r), \quad (3)$$

где p_0 – начальное значение давления воздуха в ШВС.

Используя зависимость (3), для депрессии в ШВС можно записать следующее соотношение: $h(t)/h_{\infty} = 1 - h_0/h_{\infty} \exp(-t/\tau)$, где h – текущее значение депрессии в ШВС; h_{∞} – конечное значение депрессии в ШВС после реверсирования ВГП; h_0 – начальное значение депрессии в ШВС до реверсирования ВГП; τ – безразмерное время процесса ($\tau = t/t_r$). Расчетные значения зависимостей $P = P(t)$ и $H = H(\tau)$, где $P = p(t) / p_{\infty}$; $H = h(\tau) / h_{\infty}$ показывают, что их кривизна зависит от конечных значений давления воздуха или депрессии в ШВС после реверсирования ВГП и величины периода релаксации, а, следовательно, и общая длительность переходного аэродинамического процесса при реверсировании ВГП будет зависеть от этих параметров.

Теоретически рассмотрена ситуация, когда после длительной остановки вводится в работу ГВУ. Чаще всего данная ситуация встречается в том случае, когда режим работы рудника исключает одну из рабочих смен (пример – рудник ОАО «KNAUF ГИПС Новомосковск»). Перед началом работ включается главная вентиляторная установка, работающая на нагнетание. В данный момент давление в руднике равно атмосферному, т.е. избыточное давление равно нулю. То же самое и в выработанных пространствах. В первый момент следует предположить, что воздух под влиянием работы вентилятора начнет поступать в выработанные пространства, т.к. за ними расположены выработки, обладающие сопротивлением, на преодоление которого нужно затратить дополнительное давление. В выработанных пространствах, как уже было сказано, сопротивления практически нет. В этот момент складывается ситуация, показанная на рис. 3, а.

Вентиляторная установка будет преодолевать сопротивление сети выработок, расположенных до выработанных пространств, следовательно, вентилятор будет развивать наименьшее давление и максимальную производительность.

В следующее мгновение в выработанных пространствах начинает увеличиваться противодавление $h_{ВП} = f(V + Q_3, V, t_0)$ за счет вошедшей в первое мгновение части воздуха Q_3 . Это противодавление будет равно давлению,

создаваемому ВГП в данной части вентиляционной сети. Это же давление будет причиной возникновения движения воздуха в выработках после выработанных пространств. Таким образом, выработанные пространства будут действовать как источник тяги, а вентиляционная сеть примет вид, показанный на рис.3, б.

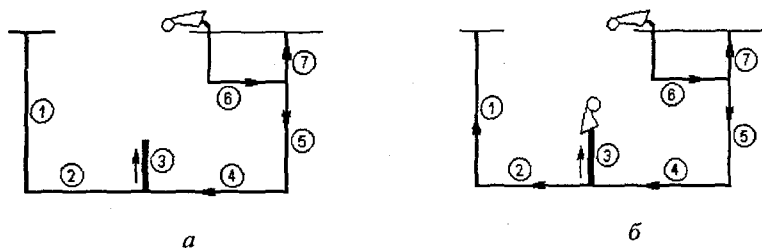


Рис. 3. Изменение схем вентиляционной сети при включении ГВУ после ее длительной остановки

Следующее мгновение повторит предыдущее, и так до тех пор, пока давление в выработанных пространствах не будет равно максимальному давлению, создаваемому ВГП в данной части вентиляционной сети. В этом случае будет сохраняться условие $Q_4 = Q_2$. На рис. 4 приведены результаты расчетов изменения давления, которое развивает вентиляторная установка (кривая ГВУ), а также давления, которое создается в открытых полых выработанных пространствах (кривая ВП) в вентиляционной сети на рис. 3. Как видно из рис. 4, наблюдается рост давления вентилятора и, естественно, в выработанном пространстве, однако интенсивность роста давления вентилятора несколько ниже роста давления в выработанном пространстве.

Объясняется это следующим: падение давления в выработках перед выработанным пространством намного больше, чем в выработках за выработанным пространством (если принять примерно одинаковые их аэродинамические сопротивления), т.к. в последних протекает только часть воздуха, поступающего в шахту. Поэтому падение давления в выработках за выработанным пространством слабо влияет на полное давление, теряемое в шахте, т.е. на давление, развиваемое ВГП.

На рис. 5 приведена вентиляционная сеть с изолированными пространствами, которые наполняются воздухом только за счет утечек воздуха через изолирующие устройства. Расчеты вентиляционной сети показали, что направление воздуха в ветви 9 принято первоначально неверно, т.е. по этой ветви поток воздуха направлен в выработанные пространства (стрелка под ветвью). Ниже в виде кривых приведены результаты расчета изменения потоков воздуха в выработках (ветвях 9 и 10), подводящих воздух к выработанным

ным пространствам (кривые 10 и 9), а также объемов воздуха, которыми выработанные пространства наполняются (кривая 3 на рис. 6).

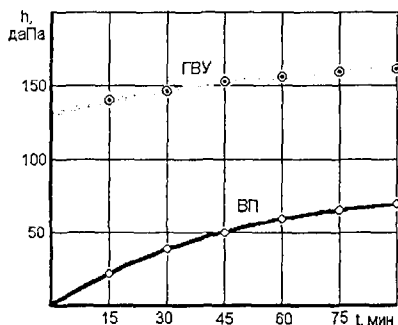


Рис. 4. Изменение давления в выработанных пространствах и создаваемого вентиляторной установкой

Как видно из графика, объемы воздуха Q_3 , заполняющие выработанные пространства, постепенно уменьшаются. Наполнение их идет медленно. Поскольку в выработанные пространства со стороны ветвей 9 и 10 поступают небольшие объемы воздуха $Q_3 = Q_9 + Q_{10}$, то в целом этот процесс слабо влияет на вентиляционную обстановку в руднике. В отличие от ситуации, показанной на рис. 3, а, в сети на рис. 3 в выработках, находящихся за выработанными пространствами, потоки воздуха возникают сразу с первого мгновения. Это обусловлено тем, что к выработанным пространствам ведут выработки с сравнительно большим аэродинамическим сопротивлением. Таким образом, при включении ВГП в работу после длительной остановки на их режим работы существенное влияние оказывают открытые полые выработанные пространства.

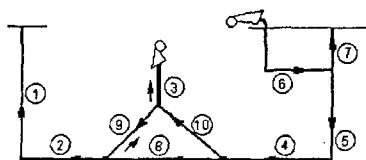


Рис. 5. Вентиляционная сеть с изолированными выработанными пространствами (ветвь 3)

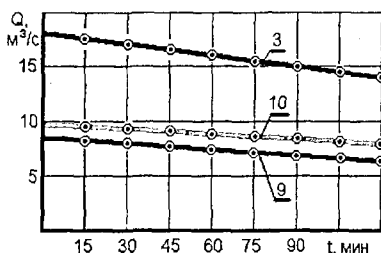


Рис. 6. Изменение воздухораспределения в ветвях 3, 9 и 10

Вентиляционная сеть на рис. 5 по параметрам близка к сети реального рудника, а поэтому расчеты дают представление о продолжительности переходного периода от включения вентиляторов до момента становления установившегося проветривания. Данная ситуация должна быть принята во внимание тогда, когда необходимо установить продолжительность работы ВГП для достижения нормального состояния рудничной атмосферы, прежде чем допустить к работе персонал.

Шахтные наблюдения, лабораторные эксперименты, а также результаты математического моделирования свидетельствуют о том, что связь между газовыделением и формированием поля концентраций выделяющихся газов, проявляется в виде взаимообусловленности существования этих явлений, разделенных в пространстве и времени. Особенности прогноза газовых ситуаций на очистных участках заключаются в том, что это по существу, фрагменты общей вентиляционной сети с распределенными источниками выделения газовых примесей и поглощения кислорода, поэтому моделирование средней в сечении выработки концентрации сводится к решению задачи сетевой газодинамики. Очевидно, что очистной участок можно рассматривать как вентиляционную сеть, имеющую Δ ветвей и Δ узлов. Процессы переноса в каждой ветви вполне обоснованно можно считать происходящими за счет одномерной конвективной диффузии, тогда нестационарное поле концентраций в ветвях будет описываться следующим уравнением:

$$\frac{\partial c_{\lambda}}{\partial t} + u_{\lambda} \frac{\partial c_{\lambda}}{\partial l} = \frac{I_{r.n}^{\lambda}(t)}{V_{\lambda}}, \quad (4)$$

где $\lambda \in \Delta$; $i, j \in \Delta$; c_{λ} - концентрация газовой примеси в ветви с номером λ ; $I_{r.n}^{\lambda}$ - интенсивность поступления газовой примеси в ветвь с номером λ ; u_{λ}, V_{λ} - скорость воздуха и объем выработки; l - пространственная координата; i, j - смежные узлы, соединяющиеся ветвью λ .

Решение уравнения (4) для постоянного начального и переменного граничных условий позволило получить соотношение для определения концентраций газовой примеси во внутренних и внешних узлах сети. Эти соотношения можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} & \text{внешние узлы вентиляционной сети} \\ & \sum_{\lambda^+} S_{\lambda} u_{\lambda} \left\{ c_0 \left[1 - \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) \right] + \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) c_{\lambda^+}(l, t) + \right. \\ & \left. + V_{\lambda}^{-1} \left[\int_0^t I_{r.n}^{\lambda}(\tau) d\tau - \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) \int_0^{t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}}} I_{r.n}^{\lambda}(\tau) d\tau \right] \right\} - \sum_{\lambda^-} S_{\lambda} u_{\lambda} c_{\lambda^-}(0, t) = 0. \quad (5) \end{aligned}$$

внутренние узлы вентиляционной сети

$$c_j(t) = \sum_{\lambda} S_{\lambda} u_{\lambda} \left\{ c_0 \left[1 - \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) \right] + \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) c_j(t) + V_{\lambda}^{-1} \left[\int_0^t I_{r,n}^{\lambda}(\tau) d\tau - \sigma_0 \left(t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}} \right) \int_0^{t - \frac{l_{\lambda}}{u_{\lambda}}} I_{r,n}^{\lambda}(\tau) d\tau \right] \right\} \left[\sum_{\lambda} S_{\lambda} u_{\lambda} \right]^{-1}, \quad (6)$$

Газодинамическую сеть можно представить в виде следующей матрицы

$$B_{km} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & i_1 & j_1 & l_{\lambda 1} & u_{\lambda 1} & I_{r,n1}^{\lambda} & c_{1-} & c_{1+} \\ \lambda_2 & i_2 & j_2 & l_{\lambda 2} & u_{\lambda 2} & I_{r,n2}^{\lambda} & c_{2-} & c_{2+} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_n & i_n & j_n & l_{\lambda n} & u_{\lambda n} & I_{r,n}^{\lambda} & c_{n-} & c_{n+} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрица (7) полностью характеризует газодинамическое состояние сети горных выработок очистного участка в любой момент времени. В начальный момент времени она описывает топологию рассматриваемой сети, ветвям которой поставлены в соответствие параметры l_{λ} , S_{λ} , u_{λ} и коды, характеризующие источники газовой выделений $I_{r,n}$. Предпоследний столбец матрицы B_{km} заполняется численными значениями концентраций во внешних граничных узлах, а для ветвей, не имеющих внешних узлов, элементы столбца принимаются равными нулю. Последний столбец состоит из нулей. Следовательно, спрогнозировать газовую ситуацию на очистном участке в любой момент времени - это заполнить B_{7n} , B_{8n} и B_{9n} для этого момента времени. Для расчета элементов столбцов B_{7n} , B_{8n} и B_{9n} можно использовать разработанный комплекс программных средств, представляющий результаты вычислений в виде матрицы (7).

Газовые ситуации на очистных и подготовительных участках моделируют с помощью уравнения конвективно-турбулентной диффузии газовой примеси в воздухе. При этом рассматривают однородную и изотропную турбулентность, пренебрегая двумя размерами горных выработок и учитывая только длину. Если учесть конвективный и турбулентный диффузионные потоки, то математическая модель газовой ситуации в подготовительной выработке при постоянном атмосферном давлении будет иметь следующий вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_{cp} \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{u}{L_{пв}} C + \frac{I_{пв}}{\Omega_{пв}}, \quad (8)$$

где u_{cp} - средняя скорость движения воздуха по подготовительной выработке; $L_{пв}$ - проектная длина подготовительной выработки; $I_{пв}$, $\Omega_{пв}$ - абсолютная газообильность и объем подготовительной выработки; $C = c - c_{н}$; $c -$

объемная концентрация рассматриваемой газовой примеси в воздухе выработки; c_H - объемная концентрация газовой примеси на свежей струе, поступающей в подготовительную выработку.

Объемная концентрация газовой примеси в уравнении (8) задается в долях единицы, а $c_H = \text{const}$. Начальные и граничные условия для протяженной подготовительной выработки можно записать следующим образом: $C(x, 0) = C(0, t) = 0$; $\lim_{x \rightarrow \infty} C(x, t) \neq \infty$. Решение этой краевой задачи получено

в виде

$$C(x, t) = \frac{Dl_{п.в.}}{\Omega_{п.в.}} \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{u_{сп}}{L_{п.в.}} t\right) \right] + 0,5 \exp\left(-\frac{u_{сп}}{L_{п.в.}} t\right) \int_0^t \exp\left(\frac{u_{сп}}{L_{п.в.}} \tau\right) \times \right. \\ \left. \times \left[\exp(-K\sqrt{b}) \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}} - \sqrt{b\tau}\right) + \exp(K\sqrt{b}) \operatorname{erfc}\left(\frac{K}{2\sqrt{\tau}} + \sqrt{b\tau}\right) \right] \right\} d\tau, \quad (9)$$

где $K = \frac{x}{\sqrt{D}}$; $b = \frac{u_{сп}^2}{4D} + \frac{u_{сп}}{L_{п.в.}}$.

Результаты вычислительных экспериментов по динамике полей концентраций примесей на очистном и подготовительном участках представлены на рис. 7 - 8. Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что поля концентраций газовых примесей в воздухе очистных и подготовительных участков стремятся к некоторому стационарному состоянию. Анализ полученных стационарных кривых показывает, что они близки к линейным функциям, что при необходимости позволяет использовать начальные слагаемые при разложении экспонент в базовых формулах в бесконечные ряды. Вторым не менее важным выводом, качественно подтверждающим адекватность разработанных моделей, - это возрастание концентрации по направлению движения струи воздуха.

В целом, моделирование аварийной ситуации в шахте показало, что выработанные пространства в течение длительного периода времени могут играть роль источников тяги и в аварийной ситуации (при пожаре, к примеру) станут причиной заполнения газами многих выработок на большой длине. Как показали расчеты, подтверждаемые практикой, выработанные пространства большого объема не дают возможности реверсировать струи воздуха в выработках большей части рудника (шахты). Участие вентиляторов главного проветривания в реверсивном аварийном проветривании рудника способствует ускоренному наполнению воздухом выработанных пространств, сокращая время их действия в качестве источников тяги. Расчет вентиляционной сети данной ситуации показал, что падение депрессии в выработанных пространствах происходит очень длительное время (для данного рудника достигает до 90 минут, что не дает возможность реверсировать струи воздуха в выработках большей части рудника. Данные расчеты выявляют выработки, которые находятся свободными от пожарных газов и выработки, которые заполняются пожарными газами.

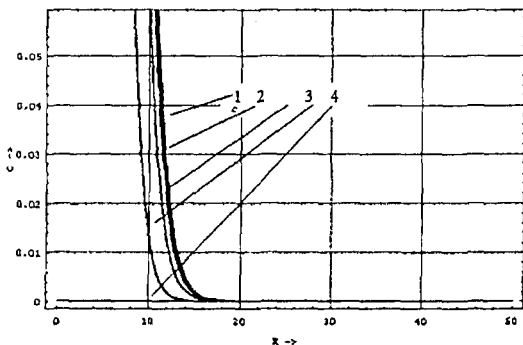


Рис. 7. График зависимости C от K :
$$C = \frac{C(x,t)\Omega_{П.В.}}{DI_{П.В.}} + \exp\left(-\frac{u_{ср}t}{L_{П.В.}}\right) - 1;$$

$b=0,625$; $u_{ср}/L_{П.В.}=0,5/1000$; 1 - $t = 10$ мин; 2 - $t = 30$ мин; 3 - $t = 60$ мин;
4 - $t = 120$ мин; 5 - $t = 360$ мин.

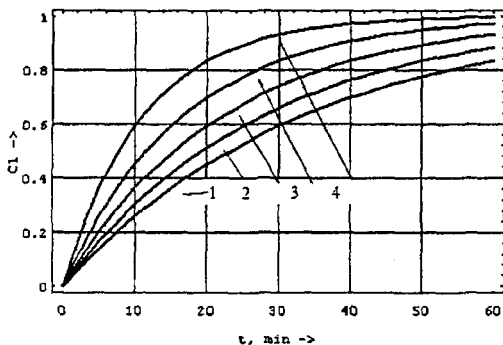


Рис. 8. График зависимости C_1 от t при $t < x/(u)$:

$C_1 = C(x,t)Q_{O.Y.}/I_{П.В.}$ при $\langle u \rangle / \Sigma L_{O.Y.}$ равном: 1 - 1,5/1000 (кривая 1);
2 - 1,5/1500 (кривая 2); 3 - 1,5/2000 (кривая 3); 4 - 1,5/2500 (кривая 4);
5 - 1,5/3000 (кривая 5).

Результаты исследований доведены до промышленного применения на калийных рудниках ОАО «Сильвинит» и руднике фирмы ОАО «KNAUF ГИПС Новомосковск». Основные научные результаты используются в курсе

«Аэрология горных предприятий» кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании экспериментальных и теоретических исследований установлены новые и уточнены существующие закономерности аэрогазодинамических процессов диффузионного переноса газовых примесей в рудничной атмосфере и релаксации давления в вентиляционных сетях горных выработок и выработанных пространств рудников и угольных шахт, обусловленных аварийными режимами вентиляции, позволяющие повысить эффективность практической реализации планов ликвидации аварий, что имеет важное значение для горнодобывающих предприятий России.

Основные научные и практические результаты работы, рекомендации заключаются в следующем.

1. Разработаны методические положения прогнозирования газовых ситуаций при реверсировании ВГП на основе установленных и уточненных закономерностей аэрогазодинамических процессов диффузионного переноса газовых примесей в рудничной атмосфере и релаксации давления в вентиляционных сетях горных выработок и выработанных пространств рудников и угольных шахт, обусловленных аварийными режимами вентиляции.

2. Разработана методика проведения эксперимента в шахтных условиях по определению параметров переходного периода вентиляции при включении вентилятора главного проветривания после его длительной остановки, а также измерений рабочих параметров вентилятора в начальный период после его включения в работу. Проведены экспериментальные исследования влияния выработанных пространств на режим работы вентиляторных установок в переходный период аварийной вентиляции на базе вентиляторов ВОД-30, В-УПДТ-2,4 и ВРЦД-4,5.

3. Усовершенствована методика аналитического описания действительной кривой характеристики вентилятора по данным заводских испытаний и данным хотя бы одного измерения действительного режима работы главной вентиляторной установки.

4. Доказано, что переходный процесс в ветвях вентиляционной сети после реверсирования ВГП может длиться от 20 до 90 мин, а скорость изменения давления при этом будет убывать пропорционально отношению разности давлений между конечным и текущим значением к периоду релаксации давления.

5. Обосновано методическое положение, в соответствии с которым особенности прогноза газовых ситуаций на очистных участках заключаются в том, что они, по существу, являются фрагментами общей вентиляционной сети с распределенными источниками выделения газовых примесей и поглощения кислорода, поэтому моделирование средней в сечении выработки кон-

центрации сводится к решению задачи сетевой газодинамики. Разработана структура матрицы, характеризующей газодинамическое состояние сети горных выработок в любой момент времени.

6. Доказано, что поля концентраций газовых примесей в воздухе очистных и подготовительных участков стремятся к некоторому стационарному состоянию. Анализ полученных стационарных кривых показывает, что они близки к линейным функциям, что при необходимости позволяет использовать начальные слагаемые при разложении экспонент в базовых формулах в бесконечные ряды.

7. Усовершенствован алгоритм расчета системы «ВГП – ШВС» при аварийных режимах вентиляции и разработан комплекс программных средств для ситуационного моделирования в планах ликвидации аварий.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Постникова М.Ю. Влияние выработанных пространств на вентиляцию при реверсии общерудничной струи в аварийных ситуациях. Молодежь и наука: XXI века: сб. матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2008. С.27-30.

2. Постникова М.Ю. Способ представления выработанных пространств ветвью при расчете вентиляционных сетей: материалы Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2007. С. 27-28.

3. Мохирев Н.Н., Постникова М.Ю. Графическое решение некоторых вентиляционных задач: сб.статей XXXIII Науч.-практич. конф. Пермь, 2004. С.36-38.

4. Мохирев Н.Н., Постникова М.Ю. Модель аварийной ситуации при пожаре в шахтах // Вестник ПГТУ. «Нефтегазовое и горное дело» Вып.7. Пермь, 2007. С.42-44.

5. Мохирев Н.Н., Постникова М.Ю. Результаты воздушно-депресссионной съемки шахты «Шаргуньская» (Узбекистан) // Вестник ПГТУ. «Нефтегазовое и горное дело». Вып.7. Пермь, 2007. С. 47-50.

6. Мохирев Н.Н., Постникова М.Ю. Моделирование аварийных ситуаций в шахтах с целью создания безопасных условий эвакуации горнорабочих: тезисы докладов 16-й Всерос. конф. молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках». Пермь, 2007. С.63-64.

7. Постникова М.Ю., Николаев А.В. Результаты испытания вентиляторной установки главного проветривания на руднике СКРУ-3. Материалы краевой науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых в Пермском крае». Пермь, 2008. С. 33-36.

8. Мохирев Н.Н., Постникова М.Ю. Отработанное пространство и его влияние на режимы работы вентиляторов главного проветривания // Записки горного института «Проблемы недропользования». Т. 181. Санкт-Петербург, 2009. С. 46-47.

9. Постникова М.Ю. Форма представления выработанных пространств в вентиляционных сетях, моделирующих аварийные ситуации в шахтах // Научно-технический журнал «Рудник будущего». Вып.2. Пермь, 2010. – С. 87-89.

10. Постникова М.Ю., Наумов И.С. Моделирование аварийных ситуаций при пожаре в шахтах: сб. трудов VI Междунар. науч.-практич. конф. «Рудник будущего: проекты, технологии, оборудование». Ч. I, Проектирование и строительство горнодобывающих предприятий. Вып.3. Пермь, 2010. – С.88-90.

11. Качурин Н.М., Постникова М.Ю., Власов Д.В. Релаксация давления воздуха в вентиляционной сети рудника при реверсировании вентилятора главного проветривания // Изв. ТулГУ. Серия «Науки о Земле» // ТулГУ. 2010. Вып. 2. С. 73-76.

12. Качурин Н.М., Постникова М.Ю., Власов Д.В. Аэрогазодинамические процессы в вентиляционных сетях рудников, обусловленные диффузией газовых примесей // Изв. ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2010. Вып. 2. С. 77-81.

14. Постникова М.Ю., Качурин Н.М. Влияние выработанных пространств рудников на процесс реверсии воздушных струй в горных выработках. // Изв. ТулГУ. Сер. «Науки о Земле». 2010. Вып. 2. С. 116-120.

15. Постникова М.Ю. Влияние выработанных пространств на вентиляцию рудников в переходный период аварийной вентиляции // Горный информ.-анал.бюллетень. 2011. № 3. С. 206-209.

Изд. лиц. ЛР №020300 от 12.02.97. Подписано в печать 2.02.11.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 002.

Тульский государственный университет. 300600, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300600, г. Тула, ул. Болдина, 151.