МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АЭРОЛОГИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Днепропетровск
НГУ
2015

УДК 622.41.012.2
ББК 26.233
А36

Рекомендовано вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» як навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050301 Гірництво (протокол № 7 от 28.05.2015).

Рецензенти:
А.О. Гурін, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри рудникової аерології та охорони праці (Криворізький національний університет);
А.С. Беліков, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності (Придніпровська державна академія будівництва та архітектури).

ISBN 978–966–350–545–9

Аэрология горных предприятий: учеб. пособие / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, А.А. Литвиненко, О.А. Муха; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 206 с.

А36

Рассмотрены состав и свойства рудничной атмосферы, метан и способы борьбы с ним, запылённость атмосферы горных предприятий, тепловой режим шахт и карьеров, основные законы аэромеханики, аэродинамическое сопротивление горных выработок, шахтные вентиляционные сети, естественная тяга воздуха в шахтах и работа вентиляторов на шахтную вентиляционную сеть.

Пособие соответствует программе дисциплины «Аэрология горных предприятий» для студентов направления подготовки «Горное дело» и может быть использовано при подготовке и повышении квалификации инженерно-технических работников горных предприятий.

ISBN 978–966–350–545–9

УДК 622.41.012.2
ББК 26.233

© В.І. Голінько, Я.Я. Лебедєв, А.А. Литвиненко, О.А. Муха, 2015
© Державний ВНЗ «НГУ», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 6

1. АТМОСФЕРА ГОРНЫХ ПРЕДПРЯТИЙ 9
1.1. Состав атмосферного воздуха 9
1.2. Свойства главных составных частей воздуха 10
1.3. Понятие о рудничном воздухе 13
1.4. Газообильность шахты 14
1.5. Ядовитые и вредные примеси рудничного воздуха 15
1.6. Способы измерения содержания газов в воздухе 24
Вопросы для самоконтроля 27

2. МЕТАН 28
2.1. Физико-химические свойства метана 28
2.2. Происхождение метана и виды связи его с горными породами 31
2.3. Метаноносность и метаноёмкость угольных пластов и пород 31
2.4. Виды выделения метана в шахтах 33
2.4.1. Обыкновенное выделение метана 33
2.4.2. Суфлярное выделение метана 35
2.4.3. Внезапное выделение метана. Газодинамичекие явления в шахтах 37
2.5. Газовый баланс шахты 42
2.6. Категория шахт по метану 43
2.7. Допустимое содержание метана в атмосфере горных выработок ... 44
2.8. Меры борьбы с метаном средствами вентиляции 45
2.9. Дегазация шахт 47
2.9.1. Дегазация при проведении подготовительных выработок 48
2.9.2. Дегазация неразгруженных угольных пластов 50
2.9.3. Дегазация сближенных угольных пластов и вмещающих пород при их подработке и надработке 51
2.9.4. Дегазация выработанного пространства скважинами 54
2.10. Борьба со слоевыми скоплениями метана 55
2.11. Борьба с суфлярами 58
2.12. Меры борьбы с внезапными выбросами 62
2.12.1. Прогнозирование выбросоопасности угольных пластов 62
2.12.2. Способ прогноза выбросоопасности перед вскрытием угольных пластов 66
2.12.3. Предотвращение выбросов угля, пород и газа 66
Вопросы для самоконтроля 71

3. ЗАПЫЛЁННОСТЬ АТМОСФЕРЫ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 72
3.1. Общие сведения о рудничной пыли и ее влияние на организм человека 72
3.2. Угольная пыль. Способы предупреждения взрывов пыли 76

3.2.1. Взрывчатые свойства угольной пыли …….. 76
3.2.2. Факторы, влияющие на взрывчатость угольной пыли ……... 77
3.2.3. Особенность и последствия взрывов угольной пыли в шахтах . 77
3.2.4. Меры борьбы со взрывами угольной пыли ……. 78
3.3. Карьерная пыль ……. 79
3.3.1. Образование пыли в карьерах ……... 79
3.3.2. Борьба с карьерной пылью как профессиональной вредностью 81
Вопросы для самоконтроля …… 85

4. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ……... 86
4.1. Тепловой режим шахт. Нормализация микроклимата шахт …… 86
4.1.1. Температура воздуха ……. 87
4.1.2. Влажность воздуха ……. 89
4.1.3. Кондиционирование рудничного воздуха ……... 90
4.2. Микроклимат карьеров …… 93
4.2.1. Общие сведения о микроклимате карьеров ……. 93
4.2.2. Образование туманов в карьерах …….. 98
4.2.3. Кондиционирование воздуха в карьерах …… 100
Вопросы для самоконтроля…… 105

5. РУДНИЧНАЯ АЭРОМЕХАНИКА …… 107
5.1. Основные физические характеристики воздуха ……107
5.2. Основные законы аэростатики ……..……...109
5.3. Основные законы движения воздуха в горных выработках …… 110
5.3.1. Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности движения 110
5.3.2. Закон сохранения энергии. Уравнение движения воздуха по горным выработкам (уравнение Бернулли) ……....111
5.4. Свободные турбулентные струи ……..……...116
5.5. Инженерные расчёты свободных струй ……121
Вопросы для самоконтроля …… 124

6. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК .125
6.1. Режимы движения воздуха в шахтах и закон сопротивления ..…….. 125
6.2. Сопротивление трения ……..……...127
6.3. Местные сопротивления ……...129
6.4. Лобовое сопротивление ……... 130
6.5. Единцы измерения аэродинамических параметров ……...132
6.6. Депрессия ……...134
6.7. Характеристика воздуховода ……... 134
6.8. Силы, формирующие движение воздуха в карьерах …… 135
Вопросы для самоконтроля …… 136

7. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СЕТИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ……..……138
7.1. Основные понятия и соотношения ……..……... 138
7.2. Методы расчёта вентиляционных сетей …… 140

7.2.1. Последовательное соединение выработок ……...141
7.2.2. Параллельное соединение выработок …….. 142
7.2.3. Диагональное соединение выработок …….. 144
7.3. Основные схемы естественного проветривания карьеров ……... 146
Вопросы для самоконтроля …… 148

8. ПЫЛЕГАЗОДИНАМИКА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ …….. 149
8.1. Основные понятия газовой динамики карьеров ……150
8.2. Распределение газа, выделяемого точечным и линейным источниками …….....151
8.3. Распределение газов при взрывных работах ……..... 154
8.4. Основные понятия и законы пылевой динамики 155
8.5. Распределение пыли, выделяемой точечным и линейным источниками …… 157
8.6. Распространение пыли при взрывных работах ……. 158
8.6.1. Анализ физических процессов выброса пылегазового облака .. 159
8.6.2. Метод расчёта высоты подъёма пылевого облака с учётом дисперсности частиц ……...164
8.6.3. Расчёт скорости осаждения пылевых частиц из пылегазового облака …….. 172
8.6.4. Оценка параметров рассеивания пылевого облака при массовых взрывах в карьерах ……176
8.7. Запылённость атмосферы карьеров в целом ……..193
Вопросы для самоконтроля…… 194

9. ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЯГА ВОЗДУХА В ШАХТАХ ……...195
9.1. Общие сведения о естественной тяге ……..... 195
9.2. Измерение депрессии естественной тяги ……..…… 196
9.3. Расчёт депрессии естественной тяги …….. 198
9.4. Аэродинамическая характеристика естественной тяги …… 198
Вопросы для самоконтроля…….. 199

10. РАБОТА ВЕНТИЛЯТОРОВ НА ШАХТНУЮ СЕТЬ ……200
10.1. Общие сведения о вентиляторах …….....200
10.2. Аэродинамическая характеристика вентилятора ……202
10.3. Работа одиночного вентилятора на шахтную сеть …… 202
Вопросы для самоконтроля……203

ЛИТЕРАТУРА …… 204

ВВЕДЕНИЕ

Аэрология горных предприятий – научная дисциплина, изучающая свойства атмосферы шахт и карьеров, законы движения воздуха, переноса его газообразных примесей, пыли и тепла в горных выработках и карьерном пространстве и являющаяся теоретической основой организации эффективной вентиляции шахт и карьеров.

Основные составные части курса «Аэрология горных предприятий»:

- рудничная атмосфера;
- рудничная аэромеханика.

Значение аэрологии в деле создания нормативных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда в шахтах и на карьерах очень велико. Несмотря на достигнутые успехи в создании технических средств пылеподавления, очистки и охлаждения воздуха вентиляция до настоящего времени остаётся основным способом обеспечения регламентируемых правилами безопасности и санитарными нормами условий труда на рабочих местах.

Технология подземной и открытой добычи полезных ископаемых связана с ведением отбойки их из массива и транспортированием. Все эти процессы сопровождаются измельчением или истиранием горной массы с интенсивным пылеобразованием. Большую опасность представляют вредные и опасные примеси, поступающие в атмосферу при ведении очистных работ. Среди наиболее опасных компонентов примесей можно назвать метан на угольных шахтах и взрывные газы в карьерах. С уходом горных работ на более глубокие горизонты все более важное место занимают вопросы борьбы с высокими температурами на подземных рабочих местах. Имеются данные, что превышение температуры выше нормы наблюдаются в 700 забоях шахт. На некоторых шахтах температура горных пород достигает 70ºС. Средствами вентиляции удаляется из шахты, в целом, 90% газа, а теплоизбытков – 60…70%. Поэтому вопросы вентиляции горных предприятий решаются совместно с решением вопросов технологии.

Аэрология карьеров, кроме этого, изучает аэромеханические и термодинамические процессы, которые происходят в атмосфере, использование природных сил и факторов для повышения интенсивности естественного проветривания карьеров с целью создания на открытых разработках нормальных и безопасных санитарно-гигиенических условий труда. При этом используются достижение сопредельных наук, прежде всего, метеорологии, аэромеханики и термодинамики. Используются законы состояния земной атмосферы, расчеты солнечной радиации, прогноз погоды, законы аэростатики и турбулентного движения воздуха, теория свободных струй и диффузии газов, механика аэрозолей, законы теплообмена и др.

Высокие уровни загрязнения атмосферы глубоких карьеров являются серьезным препятствием на пути интенсивного проведения горных работ в периоды недостаточно эффективного естественного обмена воздуха. При увеличении глубины карьера условия естественного обмена воздуха в них

ухудшаются, средние уровни запыленности и загазовывания на рабочих местах повышаются и вместе с этим возрастает опасность возникновения острых отравлений и профессиональных заболеваний у горняков. При увеличении глубины карьера до 200м скорость движения ветра в них снижается в несколько раз, а при глубине 400...500м – более чем в 10 раз.

Основными источниками загрязнения карьерного пространства являются такие процессы, как бурение скважин, транспортирование полезных ископаемых и пород, экскаваторные работы, грохочение и измельчение горной массы, перегрузка и образование отвалов. При работе одного тепловоза ТЕ23 за сутки выделяется до 4500кг условного оксида углерода, который может загрязнить атмосферу выше предельно-допустимой концентрации в объеме 150 млн. $м^3$, что равняется объему среднего по величине карьера. При неблагоприятных условиях (незначительная скорость ветра, устойчивое состояние атмосферы) естественный обмен воздуха в карьере может прекратиться полностью. В этом случае загрязнение всей атмосферы карьера выше предельно-допустимого уровня может наступить уже через несколько часов. Периоды неудовлетворительного естественного проветривания карьера достигают 10...20% от рабочего времени, что приводит даже при нормальной работе карьера к значительному материальному ущербу. Поэтому внедрение комплекса мероприятий по оздоровлению условий труда на открытых горных работах имеет большое социальное и экономическое значения.

Следует отметить успехи, достигнутые в направления борьбы с пылью как при взрывных работах, так и при экскавации и транспортировании горной массы. Значительные исследования проведены по установлению закономерностей естественного обмена воздуха, причин его нарушения. Сложилось довольно четкое представление относительно роли метеорологических факторов в процессах естественного проветривания карьеров.

В последние годы стало заметно обострение проблемы создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда в карьерах по фактору их загрязнения. С одной стороны это обусловлено углублением горных работ и, соответственно, существенным послаблением естественного воздушного обмена; с другой стороны, отсутствием новых научно-технических решений, которые бы позволили решить проблему нормализации атмосферы глубоких карьеров. Это объясняется уменьшением научных исследований в этом направлении. Одной из причин является чрезвычайная сложность проблемы, ее неординарность. Учет взаимодействия термической стратификации, радиационных и массообменных процессов в карьере при исследовании взаимодействия карьерной атмосферы с окружающей атмосферой является весьма сложной задачей. Такая естественная система как атмосфера карьера не может быть исследована в натуре общепринятыми методами. Невозможно даже измерить количество воздуха, который поступает в карьер, а тем более оценить эффективность его использования.

В наше время в зарубежных странах уже не делают попыток решения проблемы по созданию нормальных санитарно-гигиенических условий в

карьерах методами искусственного проветривания. В последние годы идет активный поиск новых средств активизации воздушного обмена с использованием энергии естественных процессов (тепло горных пород, инсоляция, ориентация отвалов, профилирование бортов карьера, аэродинамические щиты, воздушные завесы и т.п.).

Первым ученым, основоположником вентиляции шахт как науки является М.В. Ломоносов, который в работе «Первые основания металлургии и рудных дел» высказывал суждения о вентиляции шахт, а в приложении «О вольном движении воздуха в рудниках» дал научное обоснование естественной тяги.

Менделеев Д.И. в 1898 г. провел химические исследования рудничного газа.

Терпигорев А.М. посвятил ряд работ борьбе со взрывами газа (руководил работами по подготовке ПБ и ПТЭ).

Комаров В.Б. впервые провел обширные исследования аэродинамического сопротивления горных выработок.

Воронин В.Н. создал научные основы теории движения воздуха по горным выработкам.

Ксенофонтова А.И. – автор ряда трудов в области рудничной аэромеханики и вентиляции тупиковых выработок.

Щербань А.Н. – автор трудов в области рудничной термодинамики и кондиционирования воздуха.

Лидин Г.Д. заложил основы распределения, движения в недрах и выделения в горные выработки рудничных газов.

Печук И.М. – специалист в области дегазации шахт.

Ведущими учеными в аэрологии и вентиляции горных предприятий являются Абрамов Ф.А., Мустель П.И., Бойко В.А., Ушаков К.З. и др.

Разработка научных основ аэрологии карьеров была начата в 50-60 годах прошлого столетия по инициативе академика А.А. Скочинского. Значительный вклад в становлении аэрологии карьеров как науки сделали профессоры М.Г. Новожилов, Ф.А. Абрамов, К.З. Ушаков и др.

РАЗДЕЛ 1. АТМОСФЕРА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в первом разделе пособия:

- определять состав атмосферного и рудничного воздуха;
- прогнозировать источники выделения вредных и ядовитых газов;
- анализировать состав рудничной атмосферы;
- рассчитывать газообильность шахт и рудников;
- определять газоносность полезного ископаемого и вмещающих пород;
- определять категорию шахт и рудников по их газообильности;
- выявлять признаки и оценивать степень отравления вредными веществами;
- оказывать первую помощь пострадавшим при отравлении вредными и ядовитыми газами;
- разрабатывать мероприятия по борьбе с вредными газами и аэрозолями;
- организовывать контроль состава рудничной атмосферы.

1.1. Состав атмосферного воздуха

Атмосферный воздух – это смесь газов и паров, окружающих земную поверхность.

Постоянными составляющими частями атмосферного воздуха являются азот, кислород, диоксид углерода (углекислый газ), аргон, неон и другие газы. Чистый сухой атмосферный воздух имеет следующий химический состав (в % по объему):

Азот ……. 78,08;
Кислород ……. 20,95;
Аргон …… 0,93;
Углекислый газ …… 0,03;
Гелий, неон, криптон, озон, радон, водород,
перекись водорода, аммиак, йод …… 0,01.

Постоянство химического состава атмосферного воздуха обусловлено его огромной массой, непрерывным перемешиванием, взаимным уравновешиванием происходящих в природе процессов поглощения и выделения кислорода.

Изменяющиеся составные части атмосферного воздуха:

- водяные пары – 0,1…4%;
- частицы пыли и вредные газы;
- негативные и позитивные ионы, которые в зависимости от их подвижности делят на легкие и тяжелые.

В чистом воздухе находятся, в основном, легкие ионы, а в загрязненном аэрозолями – тяжелые. На организм человека благоприятно влияют легкие ионы кислорода.

1.2. Свойства главных составных частей воздуха

В этом пункте рассматриваются свойства кислорода, азота и углекислого газа.

Кислород O_2 – газ без цвета, вкуса и запаха, молекулярный вес которого составляет 32, масса 1 л O_2 равна 1,428 г. Масса 1 л воздуха при нормальных условиях (температуре 20ºС и атмосферном давлении 101,3 кПа) составляет 1,286 г. Относительная плотность кислорода в сравнении с воздухом составляет

$$\frac{1,428}{1,286} = 1,11$$

Кислород легко соединяется со многими другими простыми и сложными газами. Этот газ поддерживает горение и является необходимым для дыхания живых существ. Растворимость кислорода в воде при 20ºС составляет около 5%.

Кислород необходим человеку для дыхания. Процесс дыхания сопровождается выделением тепла в количестве до 17 кДж на 1 л кислорода, который вследствие окислительных процессов переходит в углекислый газ. Только около 20% объема вдыхаемого кислорода поступает в кровь и усваивается организмом. На каждые 4 объема углекислого газа, выделяемого при дыхании, расходуется около 5 объемов кислорода. Такое соотношение объясняется разной плотностью кислорода и углекислого газа.

Дыхательный коэффициент – это отношение объёма выделяемого из организма углекислого газа к объёму поглощаемого за то же время кислорода:

$$ДК = \frac{V_{CO_2}}{V_{O_2}}.$$

Если принять состав воздуха, который вдыхает человек, как 20,95% кислорода; 78,08% азота и 0,03% углекислого газа по объему, то состав выдыхаемого воздуха будет примерно таким: кислорода 16,2%; азота 79,67%; углекислого газа 4,03%. В этом случае дыхательный (респираторный) коэффициент равен

$$ДК = \frac{4,03 - 0,03}{20,95 - 16,20} = 0,843 .$$

В обычных условиях дыхательный коэффициент равен 0,8...0,9, а при нервном возбуждению человека или выполнении им тяжелой работы значение этого коэффициента может превышать единицу.

Количество кислорода, которое необходимо человеку для нормального протекания жизненных процессов, частично зависит от его индивидуальных свойств (веса и телосложения, возраста и др.) и в значительной степени определяется, величиной его нервного или мускульного напряжения. Можно считать, что горняк за один час отдыха потребляет кислорода в среднем около 0,25 л/мин и от 1 до 3 л/мин в периоды работы или движения. Количество кислорода, усваиваемое человеком из воздуха через легкие, зависит от парциального давления этого газа в воздухе. Усвоения кислорода кровью лучше идет при его парциальном давлении равном 21,3 кПа, что соответствует нормальной его концентрации 20,95% в атмосфере.

Если человек дышит чистым кислородом, то в течение 5...6 часов это не вызывает негативных последствий в организме, однако более длительное дыхание воздухом с повышенным содержанием кислорода не проходит бесследно. Так, если концентрация кислорода достигает 90%, то уже в конце первых суток наблюдается повышение температуры тела, замедление пульса и другие нежелательные явления в организме. В течение суток вредного воздействия не вызывает концентрация кислорода в пределах 40...60%.

В высокогорных карьерах парциальное давление кислорода уменьшается, и это ощущается человеком как кислородная недостаточность, потому что при низком парциальном давлении уменьшается насыщение крови кислородом. Например, на высоте 3000 м атмосферное давление составляет 70,1 кПа, а парциальное давление кислорода – 14,7 кПа. Если состав атмосферного воздуха соответствует нормальному, а меняется только давление, то жизнь человека не прекратится при снижении парциального давления кислорода до 8,6 кПа, а при меньшем давлении наступает смерть вследствие кислородного голода (аноксемии).

При 18% кислорода возникает сонливость, а при 17% наблюдается явление, которое называют кислородным голоданием, при котором начинается одышка и усиление сердцебиения. В подземных выработках при 12% кислорода наблюдается потеря сознания, возможна смерть. Уменьшение концентрации кислорода сначала приводит к возбуждению и безосновательному веселью, после чего возникает угнетенное состояние при общей слабости, усталости и тяжести во всем теле. Развивается апатия, притупляется интерес к окружающему, возникает головная боль в висках, в лобной и затылочной областях. Концентрация кислорода 9...12% приводит к тому, что цвет кожи лица набирает синюшный оттенок, повышается на 1...2ºС температура тела. Это сопровождается ознобом и кровотечением из носа и легких, возникают слуховые и зрительные галлюцинации.

В случаях, когда подземные выработки не проветриваются несколько дней, а также после взрывов метана и пыли, как и после пожаров, содержание кислорода может уменьшиться до 1...2%. При такой низкой концентрации кислорода, даже при отсутствии токсичных газов, уже через 1...2 минуты возникает потеря сознания, а через 5...10 минут наступает клиническая смерть.

Азот N_2 – газ без цвета, запаха и вкуса с относительной плотностью 0,97 и молекулярным весом 28. При давлении 101,3 кПа и температуре 0ºС масса 1л азота равна 1,25г. При температуре воздуха 20ºС в 100 объемах воды растворяется около 1,54 объема азота. При увеличении в воздухе содержания азота на 3...4% свободное горение становится невозможным. Азот уменьшает взрывчатость метана.

В крови человека всегда находится азот, концентрация которого возрастает при повышении атмосферного давления, такое явление может наблюдаться при нахождении человека в кессоне или при водолазных работах. Нарушение установленного режима работы, которое сопровождается внезапным снижением давления (например, аварийная ситуация при декомпрессии, или быстрый подъем водолаза на поверхность) может вызвать кессонную болезнь или даже

смерть. При быстром уменьшении давления азот насыщает кровь, начинает интенсивно выделяться в виде пузырьков (эмбол) и закупоривает при этом кровеносные сосуды. Насыщение организма азотом при высоком давлении вызывает наркотическое действие. При работе под водой на большой глубине азот в целях безопасности часто замещается другим газом, например, гелием.

Азот химически инертный, увеличение его концентрации в воздухе влияет на человека только потому, что уменьшается концентрация кислорода, в результате чего может наступить смерть от аноксемии.

При весе человека в 80 кг в его организме находится около 16 кг белков (или 2,5 кг при пересчете на чистый азот). В сутки в организм поступает от 6 до 16 г азота, но только с пищей, так как доказано еще ученым Лавуазье, живые организмы не могут усваивать азот непосредственно из воздуха.

Источником обогащения воздуха азотом являются взрывные работы. Содержание азота в угольных пластах может достигать до 2 $м^3$/т, в небольших количествах азот может выделяться вместе с метаном в угольных шахтах.

Диоксид углерода CO_2 (углекислый газ) – газ без цвета и запаха, имеет слабокислый вкус. Относительная плотность по отношению к воздуху равна 1,52, молекулярный вес 44, масса 1л газа при нормальных условиях составляет 1,98 г. В 100 объемах воды при температуре 20ºС растворяется 88 объемов CO_2. Углекислый газ при малой скорости движения воздуха может накапливаться в больших количествах в нижней части карьеров, наклонных и вертикальных подземных выработках, а также в горизонтальных выработках у почвы. При больших скоростях воздуха накопления CO_2 не наблюдается.

При 1% углекислого газа человек вдыхает воздуха значительно больше, чем при нормальном составе. При 3% содержания CO_2 частота дыхания удваивается даже в состоянии покоя, при выполнении работы дыхание человека еще больше учащается и он быстро устает, а при 5% частота дыхания утраивается и оно становится очень тяжелым. При 5...8% начинается раздражение слизистой оболочки глаз и верхних дыхательных путей, головная боль, шум в ушах, возбуждение, головокружение, ощущение жара, сердцебиение, повышение артериального давления. При выполнении работы в атмосфере с 20% углекислого газа (в изолирующих самоспасателях) у человека наблюдается покраснение кожи, ощущение покалывания. При 20...25% человеку грозит смерть от асфиксии.

Указанные симптомы усиливаются, если в воздухе одновременно с увеличением CO_2 уменьшается концентрация кислорода. В таких случаях затрудняется выделение углекислого газа из венозной крови и поглощение кислорода артериальной кровью. При очень больших концентрациях этого газа в наружном воздухе его парциальное давление может стать настолько значительным, что артериальная кровь начнет поглощать и углекислый газ одновременно с кислородом. Следствием этого является обогащение крови углекислым газом и обеднение ее кислородом, что приводит к кислородному голоданию, а также к специфическому воздействию углекислоты на нервные центры.

Наличие углекислого газа в воздухе с концентрацией 0,03...0,04% является необходимым условием для нормальной деятельности человеческого организма, так как при вдыхании этого газа он положительно влияет на дыхатель-

ный центр головного мозга, который корректирует ритм дыхания человека. При увеличении напряжения ходьбы или труда усиливается обмен веществ в организме, возрастает количество углекислоты, образующейся в нем, при этом кровь становится более кислой, сильнее раздражает дыхательный центр, возбуждает усиление дыхания. Увеличение углекислого газа в альвеолярном воздухе на 0,2% приводит к усилению вентиляции легких в 2 раза за счет роста частоты и глубины дыхания.

Согласно ПБ концентрация углекислого газа на рабочих местах не должна превышать 0,5%, а для подземных горных выработок соответственно: в исходящих струях участков – 0,5%; в исходящих струях крыла, горизонта или шахты – 0,75%; при сооружении или восстановлению подземных выработок по завалу – 1%.

Источниками выделения углекислого газа являются:

– процессы разложения органических веществ, главным образом дерева;

– процессы разложения горных пород органического и неорганического происхождения кислыми шахтными водами;

– окисление угля кислородом воздуха;

– выделение из угольных пластов и пород в составе рудничного газа, основной частью которого является метан;

– выделение из полезных ископаемых в чистом виде.

1.3. Понятие о рудничном воздухе

При движении воздуха по горным выработкам изменяются его физические свойства (давление, температура, влажность, скорость), химический состав, происходит загрязнение его механическими примесями (пылью, копотью т.п.).

Изменение состава воздуха состоит в уменьшении содержания кислорода, увеличении содержания углекислого газа, азота. Воздух может обогащаться взрывчатыми и ядовитыми газами: оксидом углерода (CO), сернистым газом (SO_2), сероводородом (H_2S), оксидами азота (NO, NO_2, N_2O_4, N_2O_5), формальдегидом (CH_2O), метаном (CH_4), водородом (H_2) и др. Кроме этого, в воздух добавляются пары (мышьяковистые, ртутные и др.), а также пыль и сажа.

Смесь различных газов и паров, заполняющих горные выработки, называется *рудничным воздухом.*

Рудничный воздух может дифференцироваться на три части:

– атмосферный воздух;

– активные газы;

– мёртвый воздух.

Атмосферный воздух – это часть рудничного воздуха при таком же соотношении компонентов, как и у воздуха на поверхности шахты.

Активные газы – это ядовитые и взрывчатые газы, входящие в состав рудничного воздуха.

Мёртвый воздух – это избыточное количество углекислого газа и азота в

соотношении, отличном от соотношения атмосферного воздуха.

В подземных горных выработках содержание углекислого газа может возрастать до 5…15%, а азота – до 85…95%. Рост содержания мёртвого воздуха в горных выработках характеризуется индексом мёртвого воздуха.

Индекс мёртвого воздуха – это отношение прироста концентрации углекислого газа к снижению концентрации кислорода в абсолютных величинах. То есть индекс мёртвого воздуха равен

$$K = \frac{|+\Delta CO_2|}{|-\Delta O_2|}$$

Индекс мёртвого воздуха для шахт колеблется в диапазоне $K = 0{,}05…0{,}18$ и является относительно постоянной величиной для каждой шахты в отдельности. Отклонение индекса мертвого воздуха от установившегося значения свидетельствует о нарушении газообменных процессов на данной шахте. На некоторых шахтах мёртвый воздух выделяется в чистом виде.

Содержание газов в воздухе характеризуется объемной или массовой концентрацией.

Объемная концентрация (объемное содержание) – это отношение объема газа, содержащегося в смеси, ко всему объему смеси (% по объему)

$$c_{об} = \frac{V_г}{V_{см}} 100 \text{ , об. \%.}$$

Массовая концентрация (массовое содержание) – это отношение массы газа к объему смеси

$$c_м = \frac{m_г}{V_{см}} \text{, мг/м}^3 \text{ (мг/л).}$$

Пересчет объемной концентрации $c_{об}$ в массовую $c_м$ производится по формуле

$$c_м = 446\, M\, c_{об} \text{, мг/м}^3,$$

где M – относительная молекулярная масса газа.

Рудничный воздух, заполняющий выработки до очистных и подготовительных забоев, мало отличается от нормального атмосферного и его называют *свежим*, а воздух, заполняющий выработки за этими забоями, очень загрязнен и называется *отработанным*.

Соответственно, воздушная струя, движущаяся от воздухоподающего ствола к забоям, называется *поступающей*, а от забоев к воздуховыдающему стволу – *исходящей*.

1.4. Газообильность шахты

Под *газообильностью объекта* понимается количество газа, выделяющегося в отдельную горную выработку, в пределах добычного участка, пласта, шахты в целом.

Различают абсолютную и относительную газообильность.

Абсолютной газообильностью шахты называется количество газа, кото-

рое выделяется в единицу времени во всех ее выработках. Абсолютная газообильность шахты определяется по формуле

$$I = Q\frac{c - c_0}{100}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где Q – количество воздуха, поступающего в шахту, м^3/мин; c_0 – содержание газа в поступающем в шахту воздухе, %; c – содержание газа в исходящей струе шахты,

Относительной газообильностью шахты называется количество газа, выделяющееся при добыче 1 т или 1 м^3 горной массы в единицу времени. Относительная газообильность шахты определяется по формуле

$$q = \frac{G}{A}, \text{ м}^3/\text{т},$$

где A – производительность шахты, т/мин; G – количество газа, м^3/мин.

Газообильность шахты в значительной степени зависит от газоносности пород и полезного ископаемого.

Природная газоносность – это количество газа (м^3), содержащееся в 1 т или 1 м^3 нетронутого массива в природных условиях.

Газоносность пород зависит от генезиса месторождений.

Породы и руды магматических месторождений характеризуются низкими коллекторскими свойствами, обусловленные их малой пористостью, газопроницаемостью и сорбционной активностью. Для них характерно малое содержание газов, скопления которых приурочены к зонам тектонических нарушений. Такие породы содержат азот, углекислый газ, водород, незначительное количество метана и его гомологов, гелия, аргона и других газов.

Осадочные породы (уголь, минеральные соли, марганцевые руды, бокситы, фосфориты и др.) характеризуются повышенной пористостью, высокой газопроницаемостью и сорбционной активностью, что обусловливает значительное содержание в них газов (в каменных углях содержание газов достигает 50 м^3/м^3). Осадочные породы содержат углеводородные газы, углекислый газ, азот, сероводород, сернистый газ, аммиак, водород, примеси редких газов и окиси углерода.

Метаморфические породы (кварциты, мрамор, графит, медные руды и др.) по газоносности занимают промежуточное положение между магматическими и осадочными породами.

Абсолютная газообильность угольных шахт достигает 200 м^3/мин, а относительная – 250 м^3/т. На некоторых полиметаллических шахтах абсолютная газообильность составляет 0,5 м^3/мин, а на золоторудных – 2,5 м^3/мин.

1.5. Ядовитые и вредные примеси рудничного воздуха

Оксид углерода CO (окись углерода) – газ без цвета, вкуса и запаха. Относительная плотность – 0,97, относительная молекулярная масса – 28, растворимость в воде при 20°С – 3,3%, масса 1 л при нормальных условиях 1,25 г. Горит и взрывается при содержании в воздухе от 12,5 до 75%, наибольшей си-

лы взрыв достигает при 30% CO, температура воспламенения газовоздушной смеси в этом случае 630–810°C.

Газ ядовит: при содержании в воздухе 0,4% CO возможно смертельное отравление. Отравление человека оксидом углерода (окисью углерода) происходит потому, что гемоглобин крови, содержащийся в красных кровяных клетках (эритроцитах), в 300 раз активнее соединяется с окисью углерода, чем с кислородом, образуя карбоксиглобин, который не соединяется с кислородом. Это блокирует передачу кислорода тканевым клеткам, что приводит к кислородному голоданию тканей. Окись углерода (угарный газ) также включается в окислительные реакции, нарушая биохимическое равновесие в тканях.

При содержании 0,08% CO во вдыхаемом воздухе человек чувствует головную боль и удушье. При повышении концентрации CO до 0,32% возникает паралич и потеря сознания (смерть наступает через 30 минут). При концентрации выше 1,2% сознание теряется после 2-3 вдохов, человек умирает менее чем через 3 минуты.

Кроме острого отравления, возможно хроническое отравление оксидом углерода при длительном пребывании человека в газовой среде с содержанием окиси углерода большим санитарной нормы. При этом поражается центральная нервная система, ухудшается зрение (нарушение цветоощущения, сужение поля зрения), появляются боли в области сердца и гипертоническая болезнь.

Первая помощь при отравлении окисью углерода:

– вынести человека из помещения с высоким содержанием CO;

– при слабом поверхностном дыхании или его остановке начать искусственное дыхание;

– способствует ликвидации последствий отравления растирание тела, прикладывание грелки к ногам, кратковременное вдыхание нашатырного спирта.

Источники появления оксида углерода: шахтные пожары, взрывы метана и угольной пыли, взрывные работы, работа двигателей внутреннего сгорания.

Согласно Правилам безопасности, объемное содержание CO в воздухе не должно превышать 0,0017%.

Оксиды азота состоят из смеси окиси азота NO, его двуокиси NO_2, четырехокиси N_2O_4 и пятиокиси N_2O_5. Они имеют бурый цвет и резкий запах. Наиболее устойчивы в воздухе NO_2 и N_2O_4.

Диоксид азота NO_2 имеет относительную плотность 1,59, относительную молекулярную массу 46,01, массу 1 л при нормальных условиях 2,05 г; N_2O_4 имеет относительную плотность 3,18, относительную молекулярную массу 92,02, массу 1 л при нормальных условиях 4,11 г. Дву- и четырехокись азота легко растворимы в воде. Реакция распада при повышении температуры:

$$N_2O_4 \xrightarrow{t} 2NO_2$$

Оксиды азота ядовиты: раздражают слизистые оболочки, могут вызвать отек легких. Токсическое действие проявляется через 4-6 ч (иногда через 20-30ч) и происходит в несколько стадий. В начальной стадии появляется небольшой кашель, слабость, головная боль. Через 30-60 минут наступает период мнимого благополучия, который длится 3-6 ч и более. В это время начинается

отёк лёгких, который нарастает и вызывает боль в груди, кашель, усиление одышки, что может привести к смерти. Смертельное отравление вызывает кратковременное вдыхание воздуха, содержащего 0,025% окислов азота.

Первая помощь при отравлении – вынести пострадавшего на свежую струю и обеспечить ему покой.

Оксиды азота образуются при взрывных работах.

Максимальное допустимое объемное содержание в воздухе NO_2 – 0,00025%.

Диоксид серы SO_2 (сернистый газ) – бесцветен, имеет сильный раздражающий запах и кислый вкус. Относительная плотность – 2,22, относительная молекулярная масса – 64,07, при 20°С в одном объеме воды растворяется 40 объемов SO_2, масса 1л при нормальных условиях – 2,86 г.

Газ ядовит: раздражает слизистые оболочки, может вызвать воспаление бронхов, отек гортани и легких. Опасным для жизни является кратковременное вдыхание воздуха, содержащего 0,05% SO_2. Запах газа ощутим начиная с содержания 0,0005%. Образуется при взрывных работах по серосодержащим породам, при шахтных пожарах, выделяется из горных пород.

Максимальное допустимое согласно ПБ объемное содержание в воздухе – 0,00038%.

Сероводород (H_2S) – газ без цвета, со сладковатым вкусом и запахом тухлых яиц. Относительная плотность – 1,19, относительная молекулярная масса – 34,09, при 20°С в одном объеме воды растворяется 4,4 объема H_2S, масса 1л при нормальных условиях – 1,52 г. Газ горит, а при содержании в воздухе 6% взрывается.

Сероводород ядовит: раздражает слизистые оболочки. Опасным для жизни является кратковременное вдыхание воздуха, содержащего 0,1% H_2S. Запах газа ощутим начиная с содержания его 0,0001%.

В случаях лёгкого отравления человека сероводородом наблюдается раздражение слизистой оболочки глаз и верхних дыхательных путей, появляется боль в глазах, светобоязнь, слезотечение, цветные круги вокруг источника света, кашель, стеснение в груди. При отравлениях средней тяжести поражается нервная система, возникает головная боль, головокружение, слабость, рвота, оглушенное состояние. Тяжёлое отравление сероводородом вызывает рвоту, нарушение сердечно-сосудистой деятельности и дыхания, обморочное состояние и смерть. У лиц, длительное время подвергающихся воздействию сероводорода, наблюдается хроническое заболевание глаз, желудочно-кишечного тракта, нарушение сна, гипертоническая болезнь и др.

Первая помощь при отравлении сероводородом – обеспечение искусственного дыхания на свежей струе, вдыхание пострадавшим хлора (с помощью платка, смоченного хлорной известью).

Сероводород выделяется из горных пород (особенно из пластов каменной соли), минеральных источников, образуется при гниении органических веществ, разложении пород шахтными водами, содержащих серу, при пожарах, взрывных работах.

Максимальное допустимое объемное содержание H_2S в воздухе

0,00071%.

Рудные шахты, в которых содержание H_2S превышает санитарную норму, считаются опасными по газу и переводятся на газовый режим.

Аммиак (NH_3) – газ без цвета, с резким запахом. Относительная плотность – 0,596, относительная молекулярная масса – 17,03, хорошо растворим в воде, масса 1 л при нормальных условиях – 0,77 г. При содержании в воздухе 30% NH_3 газ взрывается.

Аммиак ядовит: раздражает слизистые оболочки и кожу, может вызвать отек языка, гортани, острый бронхит, падение артериального давления, возбуждение и бред, а при попадании в глаза – слепоту.

Образуется при взрывных работах, тушении горящего угля водой, выделяется из апатито-нефелиновых пород. Максимально допустимое объемное содержание в воздухе 0,0025%.

Акролеин (CH_2CHCOH) – бесцветная, легко испаряющаяся жидкость, с запахом пригорелых жиров, плотность пара 1,9, хорошо растворим в воде.

Акролеин ядовит: раздражает слизистые оболочки, вызывает головокружение, рвоту, боли в желудке. В случаях тяжёлого отравления наблюдается похолодание конечностей, слюнотечение, замедление пульса, потеря сознания, смерть. Пребывание в атмосфере с содержанием акролеина 0,014 % в течение 10 мин опасно для жизни.

Образуется при разложении дизельного топлива в условиях высокой температуры. Максимальное допустимое объемное содержание в воздухе 0,00008%.

Альдегиды: анисовый ($CH_3OC_6H_4COH$), ацетатальдегид (CH_3COH), бензальдегид (C_60_5COH), коричневый ($C_вH_5CHCHCOH$), формальдегид ((HCOH), хлораль ($CC1_3COH$) образуются при работе двигателей внутреннего сгорания. Наиболее опасен формальдегид. Его относительная плотность – 1,04, он легко растворим в воде.

Газ ядовит, вызывает конъюнктивит, насморк, бронхит, расстройство пищеварения, головные боли, сердцебиение, бессонницу, отсутствие аппетита, заболевание слизистых оболочек. Максимальное допустимое объемное содержание формальдегида в воздухе 0,00037%.

Пары мышьяка (As), ртути (Hg), цианистый водород (HCN) – очень редкие ядовитые примеси шахтного воздуха. Могут образовываться при взрывных работах, выделяются при разработке соответствующих руд.

Водород (H_2) – бесцветный газ. Относительная плотность – 0,07, растворимость в воде при 20°С и 101,3 кПа – 2,1%, масса 1 л при нормальных условиях – 0,09 г. Горит и взрывается при содержании его в воздухе от 4 до 74%; температура воспламенения на 100–200°С ниже, чем метана.

Выделяется из пород, калийных пластов и угля средней степени метаморфизма, образуется при зарядке аккумуляторных батарей. Рудные шахты, в которых хотя бы на одном пласте (залежи) обнаружен водород, относятся к опасным по газу и делятся на четыре категории (табл. 1.1).

Объемное содержание водорода в зарядных камерах не должно превышать 0,5%.

Таблица 1.1

Категории рудных шахт по газообильности

Категория по газообильности	Количество горючих газов (метан + водород), выделяющихся в сутки на 1 м^3 среднесуточной добычи горной массы (относительная газообильность), м^3
I	до 7
II	от 7 до 14
III	от 14 до 21
сверхкатегорные	21 и выше или шахты, разрабатывающие пласты, опасные по выбросам и суфлярам

Примечание: при делении шахт на категории по газообильности 1 м^3 водорода принимается эквивалентным 2 м^3 метана.

Тяжелые углеводороды: этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}) – взрывчатые, обладают слабым наркотическим действием. Выделяются при разработке слабо метаморфизованных углей, могут образовываться при взрывных работах.

Ацетилен (C_2H_2) – редкая примесь шахтного воздуха. Взрывчат, может образовываться при ведении взрывных работ.

Гелий (He) – инертный бесцветный газ с относительной плотностью 0,138 и относительной молекулярной массой 4,002. При нормальных условиях в одном объеме воды растворяется один объем He, масса 1 л при нормальных условиях 0,178 г.

Находится в газах, выделяющихся из всех выбросоопасных и угрожаемых по выбросам пластов, в количестве до 1,6% от общего объема газа.

Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания представляют собой многокомпонентную и сложную смесь, так как автомобильные газы вмещают более 60 различных вредных веществ. Особенно опасным компонентом газов двигателей внутреннего сгорания является сажа, которая выбрасывается в атмосферу в виде твердых частиц размером 0,04...0,5 мкм. Частицы сажи имеют значительную удельную поверхность (до 75 м^2/г), интенсивно сорбируют канцерогенные и другие токсические вещества, которые в случае попадания в организм человека вызывают тяжелые заболевания.

В отработанных газах карбюраторных двигателей оксид углерода составляет до 95% общей токсичности выброса. В газах дизельных двигателей 50% составляют оксиды азота, 25% оксид углерода и 20% альдегиды. Общий объем вредных газов зависит от качества топлива, соответствующего регулирования и режима работы двигателя. В дизельных двигателях состав их отработанных газов зависит также от технического состояния, использования низкосортного топлива, степени нагрузки. При усилении последнего значительно увеличивается содержание сажи, оксидов азота и оксидов углерода. Даже в четырехтактных двигателей при их нормальном техническом состоянии содержание сажи в выбросе может достичь 1100 мг/м^3, а в изношенных двухтактных – 2500 мг/м^3. Если содержание сажи достигает 130 мг/м^3, то выброс становится видимым, а

если 600 мг/м^3, то черным.

Большие концентрации сажи в газах двигателей не только опасны для здоровья человека, так как при интенсивном использовании автотранспорта в карьере в периоды штиля они становятся причиной ухудшения видимости и образования тумана в атмосфере карьеру.

В последние годы проводят поиски примесей (присадок) к топливу, которые бы увеличивали полноту его сгорания в цилиндрах двигателей. Некоторые из присадок, например, бариевая, снижает содержание дыма в выбросе на 50...60% при ее концентрации в топливе в пределах 0,25...1% по объему, но применение вообще всех испытанных присадок негативно влияет на работу двигателей, снижая их ресурс.

Одним из основных средств обезвреживания выбросов является использование нейтрализаторов и специальных фильтров. Фильтры отличаются от нейтрализаторов тем, что они только задерживают вредные компоненты выброса, в то время как нейтрализаторы обезвреживают их. Предложено несколько десятков различных конструкций нейтрализаторов, различающихся между собой по принципу действия. Нейтрализаторы могут быть жидкостными, пламенными, каталитическими, термокаталитическими и комбинированными. В жидкостных нейтрализаторах отработанные газы пропускают через воду или растворы различных химических реагентов. При большом разнообразии конструкций жидкостных нейтрализаторов почти повсеместно используют 10%-ный раствор сернокислого натрия Na_2SO_3 с 0,5% примесью гидрохинона ($C_6H_6O_2$). Удовлетворительные результаты получены при использовании растворов двуугленислой соды.

Недостатки жидкостных нейтрализаторов: относительно большой вес, необходимость частой замены растворов, сложность эксплуатации при отрицательной температуре и значительные эксплуатационные расходы. Поэтому аппараты такого типа рекомендуются к использованию на мощном подземном оборудовании, а также на специальных машинах, работающих в тоннелях и карьерах на дорогах с небольшим продольным уклоном. Уже получены положительные результаты по жидкостной очистке выхлопов от оксида углерода в промышленных масштабах.

Метод пламенного дополнительного обжига, основанный на способности некоторых токсичных компонентов догорать при высокой температуре и наличии свободного кислорода в газовой смеси, используется в системах нейтрализации газов карбюраторных двигателей. Для активного протекания реакции каталитического окисления альдегидов необходимо иметь температуру не менее 550ºС, а для оксида углерода и углеводов – 700ºС.

Дополнительное выжигание оксида углерода и углеводородов осуществляется в выхлопных трубах карбюраторных двигателей за счет тепла, которое выделяется при сгорании этих компонентов (в основном CO) в присутствии дополнительного кислорода. При дополнительном выжигании CO в выхлопных газах дизельных двигателей таким методом необходимая высокая температура поддерживается за счет сгорания дополнительного топлива в специальных горелках. Основной недостаток пламенных нейтрализаторов – это большие затра-

ты топлива, которые достигают 75...80% от общих расходов двигателя. Наряду с большим расходом топлива и высокой пожарной опасностью указанные нейтрализаторы могут увеличить суммарную токсичность при нарушении работы горелки, в связи с чем пламенные нейтрализаторы не рекомендуются для массового использования на дизельных автомобилях, в том числе, на карьерных.

Дополнительное выжигание с помощью каталитических нейтрализаторов основано на свойстве некоторых веществ, называемых катализаторами, способствовать ускорению химических реакций, например, реакций окисления и восстановления.

Каталитические нейтрализаторы позволяют путем окисления превратить ядовитые компоненты (оксид углерода, альдегиды и т.д.) в безвредные (углекислый газ, водяной пар). Для нейтрализации некоторых оксидов азота используют специальные нейтрализаторы. Наиболее активным катализатором окисления является платина и ее соединения, но по отношению к оксидам азота большинство катализаторов являются инертными.

Все виды каталитических нейтрализаторов можно разделить на две группы, а именно те которые:

1) работают на гранулированных (шариковых) катализаторах;
2) используют катализаторы, нанесенные в виде тонких пленок на профилированные стержни.

Для использования на карьерных автомобилях наиболее подходят каталитические нейтрализаторы с гранулированными катализаторами, например, НКД-24.

Активными элементами стержневых каталитических нейтрализаторов являются оксикаторы. Это набор керамических стержней обтекаемой формы, покрытых пленкой катализатора толщиной 0,06... 0,07 мм, содержащий в себе платину. Эффективная работа указанных нейтрализаторов начинается при температуре в зоне реакции не менее 225ºС. Прогрев нейтрализатора после его запуска заканчивается через 10...20 минут в зависимости от режима его работы. При холостом ходе и нагрузке менее 20% нейтрализатор практически не действует вследствие низкой температуры выхлопных газов. В этот же период на активных поверхностях возникает интенсивное отложение сажи, которое при длительной работе двигателей на холостом ходу и малых нагрузках может полностью изолировать активные его поверхности и вывести из строя нейтрализатор. Восстановление активности оксикаторов можно проводить обжигом сажи открытым пламенем.

Это особенно неприемлемо для карьерных автомобилей, поскольку во время рабочего цикла наиболее низкая температура отработанных газов имеет место после спуска пустого самосвала в забой, то есть в наиболее труднопроветриваемые зоны карьера.

При термокаталитическом методе нейтрализации отработанных газов обезвреживание токсичных компонентов осуществляется на катализаторах, а поддержание необходимой температуры и предварительная очистка газов обеспечивается специальным подогревателем – электрическим или пламенным. Подогреватель включается только в периоды, когда температура в реакционной

камере падает ниже заданного уровня. Дополнительная энергия расходуется только при разогреве нейтрализатора и работе двигателя на холостом ходу, если температура газов недостаточна для эффективной их нейтрализации. Наиболее работоспособным нейтрализатором этого типа является НТК-6М. В качестве катализатора могут использоваться различные каталитически активные смеси, изготовленные в виде достаточно крепких шариков диаметром 3...5 мм (например, оксидный катализатор 406-Р-4, палладиевый шаровой ШПК-0,5 и др.).

На мощных карьерных автосамосвалах с электромеханической трансмиссией (БелАЗ-549, БелАЗ-7519, БелАЗ-7521) для стабилизации температуры в реакторах каталитических нейтрализаторов целесообразно использовать энергию электроторможения на спусках дорог. Основным недостатком каталитических нейтрализаторов является сложность конструкции, инертность по отношению к оксидам азота, необходимость периодического обслуживания, дополнительный расход топлива при пламенных подогревателях.

Главная сложность на пути практического использования различных систем нейтрализации отработанных газов автосамосвалов большой грузоподъемности заключается в выполнении требований заводов, производящих двигатели, а именно в обеспечении допустимого противодавления в системе выпуска отработанных газов.

Для автомобилей БелАЗ-540 с двигателями ЯМЗ-240 допускается противодавление до 15 кПа, что позволяет использовать на них различные системы нейтрализации газов. Другие системы нейтрализации отработанных газов (жидкостные, каталитические и др.) для автомобилей БелАЗ-7519 и БелАЗ-7521, грузоподъемностью 110 и 180 т должны создаваться с учетом этого требования.

Одним из наиболее эффективных методов снижения токсичности выхлопных газов является ликвидация переходных режимов работы двигателей, при которых имеет место максимальный уровень выделения вредных примесей.

Для уменьшения выбросов выхлопных газов в атмосферу карьеров рекомендуется использовать газотурбинные двигатели. С гигиенической точки зрения газовая турбина является лучшей, чем дизельный двигатель, благодаря высокому коэффициенту избытка воздуха и низком давлении в камере сгорания. В выхлопе турбины присутствуют низкие концентрации оксида углерода (0,010...0,015%) и очень низкие концентрации оксидов азота (0,0008...0,0010%), а альдегиды при нормальной работе турбины не выделяются. Общая удельная токсичность газовых турбин составляет 10...15% от токсичности дизельных двигателей.

Для предотвращения загрязнения атмосферы глубоких карьеров при работе автотранспорта целесообразно использование «нетоксичных» двигателей, таких как электрические, инерционные, и др. Однако, в последующие 10…15 лет они не получат массового промышленного использования. Для карьерного транспорта могут использоваться комбинированные энергоустановки, в которых совместно используются двигатель внутреннего сгорания небольшой мощности и мощная буферная аккумуляторная батарея. Двигатель внутреннего сгорания работает в постоянном стабильном режиме, одновременно заряжая

батарею, от которой питается приводной электродвигатель (или ротор-колеса). Это позволяет обеспечить минимальную токсичность отработавших газов.

Пары бензина. Бензин широко используется в карьерах как топливо для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), испарения которого взрывоопасны и ядовиты, тяжелее чем воздух. Пары взрываются при концентрации в пределах 1,1...5%. Бензин проникает в организм человека через неповрежденную кожу, возможны отравления при попадании бензина в желудочно-кишечный тракт. Наличие бензина в воздухе вызывает головную боль, неприятные ощущения в горле, кашель, раздражение слизистых оболочек глаз и носа, покраснение кожи лица. При дальнейшей интоксикации появляется кручения головы, неустойчивость походки, возможна потеря сознания, судороги, при концентрации паров бензина 35...40% наступает моментальная смерть.

Согласно ПБ предельно допустимая концентрация паров бензина в атмосфере озокеритовых и нефтяных шахт составляет 0,2мг/л.

Пары ртути выделяются при разработке месторождений киновари, а также при проведении взрывных работ с использованием взрывателей с гремучей ртутью. Пар проникает в организм через дыхательные пути и вызывает расстройство деятельности сердечно-сосудистой и нервной систем. Наблюдается дрожание вытянутых рук, век, языка, увеличивается возбудимость, уменьшается умственная работоспособность.

Радиоактивные примеси – ионизирующие газообразные продукты распада некоторых руд. Наиболее часто встречаются радон Rn, торон Tn, актинон An. Вызывают своим ионизирующим излучением поражение клеток живого организма. В воздухе могут находиться также продукты распада – эманации (продукты распада радона: изотоп полония RaA, изотоп свинца RaB, изотоп висмута RaC, излучающие α-, β- и γ-лучи). Максимально допустимое содержание радона в воздухе 10^{-9} Кюри/л.

Радон Ra-222 – радиоактивный газ без цвета, запаха и вкуса. Он в 7 раз тяжелее, чем воздух, хорошо растворяется в воде. Радон является первичным продуктом распада радия с периодом полураспада 3,8 суток, выделяется при разработке радиоактивных руд.

При работе с радиоактивными веществами имеет место внешнее и внутреннее облучение. Последнее наблюдается при использовании или наличии в воздухе радиоактивных газов и пыли, попавших внутрь организма через легкие или желудочно-кишечный тракт. Радиоактивные вещества разносятся кровью по разным органам и становятся источником внутреннего облучения, в результате чего может возникнуть лучевая болезнь (в острой или хронической форме).

Острая лучевая болезнь возможна в аварийных ситуациях при одноразовой дозе облучения 1 Зв и выше. Хроническая болезнь может возникнуть в результате длительного воздействия излучения в относительно малых дозах.

Особенность биологического воздействия радиоактивного излучения заключается в том, что даже при опасной их дозе человек ее не чувствует, а неприятные последствия проявляются лишь спустя некоторое время. Лучевая болезнь в начальной стадии может привести к нарушению функций нервной системы, возникновению общей слабости, головокружению, потери сил. При даль-

нейшем развитии болезни нарушается сердечная деятельность, возникает поражение центральной нервной системы, происходит изменение состава крови, бесплодие, поражение практически всех внутренних органов, возникает рак легких.

Первая помощь пострадавшим

Основными общими мерами первой помощи при отравлении любыми вредными газами, а также при удушье вследствие недостатка кислорода, являются:

- немедленный вывод пострадавшего из загазированной среды на свежий воздух;
- освобождение пострадавшего от одежды, которая сжимает грудную клетку и препятствует свободному дыханию;
- обеспечение пострадавшему покоя;
- выполнение при необходимости искусственного дыхания или ингаляции.

При отравлении оксидом углерода или сероводородом для ингаляции вместо кислорода рекомендуется использование карбогена. Карбоген возбуждает дыхание и стимулирует дыхательные центры мозга. В состав карбогена входят 5...7% CO_2 и 93...95% O_2. Карбоген полезен при слабом поверхностном редком дыхании или при полном прекращении последнего, а также в случаях длительного (0,5...1ч и более) искусственного дыхания. Следует помнить, что карбоген не должен использоваться в случаях, если отравление вызвано оксидами азота, углекислым или сернистым газом. В этих случаях применяют только кислород. Как только дыхание становится достаточно глубоким и частым (12…16 раз в минуту) подачу карбогена прекращают, заменяя его кислородом. В случае отсутствия у пострадавшего признаков жизни, кроме искусственного дыхания, проводят непрямой массаж сердца.

1.6. Способы измерения содержания газов в воздухе

Своевременное обнаружение в шахтном воздухе опасных отклонений от допустимой «Правилами безопасности…» концентрации газов позволяет принять меры по их устранению и восстановить безопасные условия труда.

Контроль за составом и содержанием газов в воздухе может осуществляться *непрерывно и эпизодически.*

В зависимости от назначения приборы газового контроля (газоанализаторы) подразделяются на *переносные (индивидуальные), стационарные и встроенные.*

Переносные приборы служат для эпизодического контроля содержания газов в местах работы людей.

Стационарные приборы необходимы для непрерывного контроля содержания газов в наиболее характерных узловых местах горных выработок. Они же обеспечивают отключение электрооборудования в случае превышения допустимой ПБ концентрации газов.

Встроенные в горные машины приборы сигнализируют о содержании га-

зов в воздухе и отключают их, если концентрация газов превышает допустимую.

По принципу действия газоанализаторы подразделяются на *химические, физические и физико-химические.*

Химические газоанализаторы ГХ-4, ГХ-5, ГХ-6, УГ-2 и другие основаны на принципе взаимодействия газа и реактива, помещенного в специальные трубки. Реактив под воздействием газа, содержащегося в воздухе и прокачиваемого через трубку, меняет цвет.

Химические газоанализаторы служат для экспресс-определения малых концентраций оксида углерода, оксидов азота, сероводорода, сернистого газа и др. Они состоят из набора стеклянных индикаторных трубок и мехового аспирационного насоса, с помощью которого исследуемый воздух прокачивается через трубку. Каждый реактив предназначен для определенного газа.

По длине столбика реактива, изменившего свой цвет, определяется концентрация газа (шкала концентраций имеется на стекле трубки). Под действием:

1) оксида углерода реактив приобретает светло-зеленый цвет;
2) сероводорода – коричневый;
3) оксидов азота – сине-зеленый;
4) сернистого газа – темно-синий;
5) углекислого газа – белый.

С помощью газоанализатора ГХ-5 определяется содержание только углекислого газа, ГХ-6 – кислорода. Универсальным газоанализатором УГ-2 можно определять содержание оксида углерода, оксидов азота, сероводорода, сернистого газа, хлора, паров бензина, бензола, этилового эфира, ацетилена, толуола, ксилола, углеводородов, нефти.

Достоинство этих газоанализаторов заключается в том, что они позволяют быстро (в течение 1-5 мин) определить концентрацию газа.

Недостатком их является малая точность определения (допустимая погрешность измерения ±25%).

Газоанализаторы, основанные на принципе использования физических свойств газов, подразделяются на *оптические* (интерферометрические), *оптико-акустические, термокондуктометрические*. Кроме того, известны газоанализаторы, основанные на акустическом принципе и на газочувствительных полупроводниках.

Действие *интерференционных газоанализаторов* основано на измерении смещения интерференционных полос, вызванного различной оптической плотностью исследуемого газа и эталонной газовой смеси. Смещение интерференционных полос оценивается шкалой, проградуированной в объемных процентах измеряемого газа.

Наибольшее применение на шахтах получили интерферометры типа ШИ. Интерферометры ШИ-10 и ШИ-11 предназначены для измерения концентрации метана и углекислого газа (в пределах 0…6% по объему) при раздельном и совместном их наличии в воздухе. Интерферометр ШИ-12 предназначен для измерения концентрации метана и углекислого газа в пределах 0…100% по объе-

му. Он используется для измерения концентрации газа в дегазационных трубопроводах и в воздухе при внезапных выбросах и суфлярных выделениях, а также в других случаях, когда содержание газа в воздухе превышает 6%. В случаях совместного наличия в воздухе водорода и углекислого газа используется интерферометр ГИК-1. Аналогичные интерферометры выпускаются за рубежом (в Японии, ПНР).

К достоинствам интерферометров можно отнести высокую степень безопасности, а также достаточную для практических целей точность замеров взрывоопасных газов.

Из газоанализаторов, основанных на физико-химических свойствах газов, наибольшее применение получили *газоанализаторы*, основанные *на термокаталитическом принципе*. Суть этого принципа заключается в измерении тепла, выделяющегося при окислении горючих газов на поверхности каталитически активного элемента. В качестве термосопротивления используется либо платина, либо пеллистор (состоящий из платиновой спирали, покрытой термостойким слоем из окиси алюминия), на который нанесен активный катализатор (палладий или торий). Пеллистор требует меньшего расхода энергии, и реакция окисления метана идет при более низкой температуре (500-600°С). Этот принцип положен в основу переносных газоанализаторов метана «Сигнал.5», «Сигнал.9», метан-реле ТМРК 3.1М, стационарных анализаторов метана АТ-3.1, АТ-1.1, используемых для определения концентрации метана или наличия его в воздухе.

Принцип действия *термоиндуктометрических газоанализаторов* основан на использовании разницы в теплопроводных свойствах метана и воздуха. Коэффициент теплопроводности метана на 30% больше коэффициента теплопроводности воздуха. Эти газоанализаторы используются в основном для замеров высокой концентрации метана. На термокондуктометрическом принципе основан переносный хроматограф, используемый для определения концентрации метана, углекислого газа, оксида углерода, водорода, кислорода, этана и бутана.

Оптико-акустические газоанализаторы основаны на принципе поглощения инфракрасного излучения. Анализируемый газ, поглощая инфракрасное излучение, при прерывистом облучении будет периодически нагреваться и охлаждаться. Колебание температуры вызывает колебание давления, которое фиксируется конденсаторным микрофоном. По величине давления определяется концентрация газа. Этот принцип используется в лазерных газоанализаторах.

Разрабатываются газоанализаторы, основанные на использовании газочувствительных полупроводниковых элементов. Детекторы из полупроводников используются для определения концентрации метана, этана, ацетилена, оксида углерода, водорода, углекислого газа и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Атмосферный воздух и его состав.
2. Кислород: физико-химические свойства, влияние на организм человека, нормирование в атмосфере горных выработок.
3. Азот: физико-химические свойства, влияние на организм человека.
4. Диоксид углерода: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
5. Понятие о рудничном воздухе.
6. Объемное и массовое содержание газов в рудничном воздухе.
7. Газообильность объекта. Абсолютная и относительная газообильность шахты, формулы по их определению.
8. Газоносность пород и полезного ископаемого.
9. Оксид углерода: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
10. Оксиды азота: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
11. Диоксид серы: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
12. Сероводород: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
13. Аммиак, акролеин, альдегиды: их свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
14. Водород: физико-химические свойства, влияние на организм человека, источники образования, нормирование в атмосфере горных выработок.
15. Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания и борьба с ними.
16. Радиоактивные примеси рудничной атмосферы.
17. Первая помощь пострадавшим при отравлении вредными газами.
18. Способы измерения содержания газов в воздухе. Достоинства, недостатки способов.
19. Виды контроля за составом и содержанием газов в воздухе.
20. Виды приборов газового контроля.

РАЗДЕЛ 2. МЕТАН

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной во втором разделе пособия:

– определять концентрацию метана в рудничной атмосфере;

– оценивать атмосферу горных выработок на пригодность для дыхания при наличии в ней метана;

– анализировать метано-воздушную смесь на предмет ее взрывчатости;

– обосновывать выбор взрывчатых веществ при наличии взрывчатых газов в рудничной атмосфере;

– прогнозировать последствия вспышек и взрывов метана;

– определять нижний концентрационный предел взрывчатости смеси, состоящей из нескольких взрывчатых газов;

– анализировать метаноносность угольных пластов и вмещающих пород;

– определять источники обыкновенного выделения метана;

– прогнозировать места суфлярных выделений метана и разрабатывать мероприятия по борьбе с ними;

– идентифицировать газодинамические явления в шахтах;

– выявлять предупредительные признаки газодинамических явлений;

– рассчитывать газовый баланс шахты;

– определять абсолютную и относительную газообильности объекта;

– устанавливать категорию шахты по метану;

– организовывать контроль концентрации метана в горных выработках;

– разрабатывать мероприятия по борьбе с метаном средствами вентиляции;

– определять коэффициент дегазации источников метановыделения;

– разрабатывать мероприятия по дегазации угольных пластов и вмещающих пород;

– исключать образование и организовывать ликвидацию местных и слоевых скоплений метана;

– прогнозировать выбросоопасность угольных пластов и горных пород;

– определять скорость газовыделения из угольного штыба;

– разрабатывать мероприятия по предотвращению выбросов угля, породы и газа.

2.1. Физико-химические свойства метана

Метан (CH_4) – газ без цвета и запаха, относительная плотность – 0,554, растворимость в воде – 3,5%, при обычных условиях весьма инертен и соединяется только с галогенами. Масса 1 $м^3$ метана при нормальных условиях 0,717 г.

В небольших количествах метан безвреден, но при содержании его в воздухе 43% атмосфера становится непригодной для дыхания вследствие сниже-

ния содержания кислорода до 12%. При 50…80% метана и нормальном содержании кислорода метан вызывает сильную головную боль и сонливость, искажает речь.

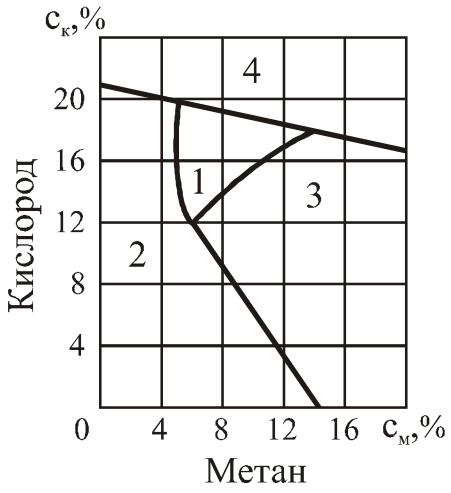
Опасность выделения метана в горные выработки заключается в том, что метано-воздушные смеси горят и взрываются. Горение и взрыв метана в воздухе происходит в соответствии с реакцией окисления

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$

т.е. при сгорании (взрыве) 1 м^3 метана образуется 1 м^3 углекислого газа и 2 м^3 паров поды.

Теплота сгорания метана составляет $78{,}5 \cdot 10^6$ Дж/кг. Температура воспламенения метана в зависимости от его процентного содержания, давления и вида воспламенителя изменяется от 650 до 750°С.

При нормальном давлении и температуре метан взрывается при содержании его в пределах 5…14% (рис. 2.1), при меньшем его содержании возможно горение при дополнительном поступлении тепла, при большем – при дополнительном поступлении кислорода.



1 - взрывчатая смесь

2 - невзрывчатая смеси

3 - смеси, могущие стать взрывчатыми при добавлении свежего воздуха

4 - неосуществимая смесь метана с воздухом

Рис. 2.1. Пределы воспламеняемости (взрывчатости) метана

Наиболее легко воспламеняется метано-воздушная смесь при концентрации метана 8%, максимальная сила взрыва развивается в смеси с 9,5% метана. Максимальная скорость распространения пламени взрыва составляет 0,67 м/с при 9,8%-ном содержании метана.

При соприкосновении с источником воспламенения вспышка метана происходит с запаздыванием, т.е. имеет место *индукционный период*, продолжительность которого составляет до 10 с при t = 650ºС, а при t = 1000ºС – 0,1 с. Эти свойства метана используются для предупреждения воспламенения метана при применении предохранительных ВВ. При этом длительность индукционного периода должна быть больше, чем время охлаждения продуктов взрыва и выброса пламени. Присутствие водорода и тяжёлых углеводородов уменьшает продолжительность индукционного периода. Так, если взрывчатая добавка содержит 70% CH_4 и 30% H_2, то такая смесь с атмосферным воздухом не имеет

индукционного периода.

Взрывы метана сопровождаются высоким давлением в месте его возникновения (до 7 МПа) и высокой температурой образовавшихся газов. При взрыве метана в камере (замкнутом пространстве) температура продуктов взрыва составляет 2150…2650°С, а при взрыве в горной выработке (открытое пространство) – до 1850°С.

Скорость распространения взрывной волны вдоль выработки изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен метров в секунду (10…1000 м/с). При взрыве метано-воздушной смеси концентрация кислорода в горной выработке может снижаться до 3…5% и пространство заполняется раскалёнными газами (N_2, CO, CO_2). При этом основной причиной смерти пострадавших является отравление и недостаток кислорода (до 70%), а оставшаяся часть работников погибает от механического воздействия ударной волны.

При взрыве метана наблюдаются два удара взрывной волны – прямой и обратный. *Прямой удар* направлен от места взрыва и связан с повышением давления вследствие выделения газов и расширения воздуха из-за высокой температуры продуктов взрыва. *Обратный удар* направлен в область взрыва и возникает вследствие резкого понижения давления из-за конденсации водяных паров и охлаждения газов, образовавшихся при взрыве. Прямой удар более сильный, однако зрительный эффект может быть от обратного удара, так как взрывная волна в обратном направлении движется по разрушенным прямым ударом горным выработкам.

Взрыв метана может сопровождаться *прямым и обратным пламенем*. При прямом пламени выжигается весь кислород при наличии некоторого количества оставшегося метана. Этот оставшийся метан дожигается воздухом, поступившим извне, создавая вторичное пламя.

При наличии смеси взрывчатых газов нижний предел её взрывчатости определяется по формуле Ле Шателье:

$$x = \frac{100}{\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \ldots + \frac{P_n}{N_n}}, \quad \%,$$

где P_1, P_2 – концентрация отдельных взрывчатых газов в смеси, % (при этом должно выполняться условие $P_1 + P_2 + \ldots + P_n = 100\%$); N_1, N_2 – нижний предел взрывчатости этих газов, %.

Например, смесь из 30% водорода и 70% метана имеет нижний предел взрывчатости в воздухе

$$x = \frac{100}{\frac{30}{4{,}1} + \frac{70}{5}} = 4{,}69\%,$$

где 4,1 – нижний предел взрывчатости водорода, %; 5 – нижний предел взрывчатости метана, %.

2.2. Происхождение метана и виды связи его с горными породами

Процессы образования метана протекали одновременно с формированием пластов угля и метаморфизмом первичного органического вещества. В процессе образования углей в результате метаморфизма первичной органической массы, покрытой наносами и лишенной доступа кислорода, происходило образование метана, его высших гомологов, сероводорода, аммиака и водорода. Существенную роль при этом играли процессы брожения, вызываемые деятельностью анаэробных бактерий.

Подобные процессы метанообразования возможны и в иных условиях при разложении органических веществ без доступа кислорода (месторождения нефтяные, каменносоляные, стронцианитовые, серные, глиняные, гематитовые, болота, пруды).

В породах метан находится в *свободном и сорбированном* состояниях. На глубоких горизонтах, где давление газа достигает 5 МПа, основное количество метана находится в сорбированном состоянии.

Различают три вида связи газа с твердым веществом:

1) *адсорбцию* – соединение молекул газа с поверхностью твердого вещества под действием сил молекулярного притяжения;
2) *абсорбцию* – проникновение молекул газа в твердое вещество без химического взаимодействия и образование «твердого раствора»;
3) *хемсорбцию* – химическое соединение молекул газа и твердого вещества.

Основное количество сорбированного углём и породами метана находится в адсорбированном состоянии.

При повышении давления количество сорбированного метана увеличивается, а при повышении температуры оно уменьшается. Сорбционная способность углей значительно выше, чем пород. С повышением степени метаморфизма угля она увеличивается.

2.3. Метаноносность и метаноёмкость угольных пластов и пород

Метаноносность – количество метана, содержащееся в природных условиях в единице массы ($м^3/т$) или объема ($м^3/м^3$) угля или породы.

Метаноёмкость – максимальное количество метана, которое может поглотить единица массы ($м^3/т$) или объема ($м^3/м^3$) угля или породы при данных давлении и температуре.

Метаноемкость определяется в лабораторных условиях. Метаноносность меньше метаноёмкости вследствие миграции метана в горном массиве и выделения его из массива в атмосферу на поверхности.

Основными факторами, определяющими метаноносность угольных пластов, являются:

– степень метаморфизма;
– сорбционная способность;
– пористость;
– газопроницаемость;

– влажность;
– генезис месторождения;
– глубина залегания пласта;
– гидрогеология;
– угленасыщенность.

С увеличением степени метаморфизма угля возрастает количество образовавшегося в нем метана (объем образовавшегося метана может в несколько десятков раз превышать объем угля).

Пористостью угля определяется количество газа, находящееся в свободном и сорбированном состояниях. Чем выше пористость угля, тем больше газа в нем может содержаться при прочих равных условиях. С увеличением степени метаморфизма угля она уменьшается. Пористость углей отечественных месторождений находится в пределах 1…5%, а пористость пород – в пределах 0…6%. Содержащаяся в горной массе влага частично заполняет поровое пространство, в результате чего уменьшается его объем. Известны случаи повышения гигроскопической влажности свежедобытого угля после его дегазации, что объясняется вытеснением находящейся в порах воды перешедшим в свободное состояние газом.

Повышенная газопроницаемость способствует дегазации месторождения и уменьшению его метаноносности.

Газопроницаемость углей выше, чем пород. По мере увеличения степени метаморфизма она уменьшается. В направлении напластования газопроницаемость углей выше в 10 раз и более, чем в направлении, перпендикулярном к напластованию. С увеличением горного давления и влажности газопроницаемость углей уменьшается.

Газоносность месторождений зависит от угла падения пластов (пологие пласты более газоносны, чем крутые при прочих равных условиях).

Метаноносность угольных пластов увеличивается с ростом глубины залегания по зависимости, близкой к гиперболической. В пределах изученных глубин она может достигать 35 $м^3$/т. Метаноносность пород достигает 6 $м^3$/т.

Имеются данные, свидетельствующие об уменьшении темпа роста газоносности с глубиной и даже о ее уменьшении на достаточно большой глубине. По данным Б.М. Косенко, в Донбассе газоносность каменных углей и антрацитов достигает своего максимума на глубине 600…1300 м. При дальнейшем увеличении глубины она уменьшается. По данным М.А. Ермекова, в Карагандинском бассейне максимальная газоносность наблюдается на глубине примерно 500 м. Это явление связано с уменьшением сорбционной способности углей при повышении температуры с глубиной и с потерей антрацитами способности генерировать метан при увеличении степени метаморфизма.

Вековое движение метана из недр к поверхности и движение атмосферного воздуха в обратном направлении обусловили образование в земной коре азотно-углекислой, азотной, азотно-метановой газовых зон.

При обводнённости месторождений создаются условия для выноса метана подземными водами в результате его растворения.

Угленасыщенность продуктивных отложений месторождения (количество содержащегося в них углекислого вещества) характеризует общие запасы метана, сохранившиеся в месторождении (чем она выше, тем при прочих равных условиях большее количество газа находится в угольных пластах и вмещающих породах и тем больше доля газа, заключенная в пластах).

2.4. Виды выделения метана в шахтах

В горных выработках метан выделяется с обнаженных поверхностей угольных пластов, из отбитого угля, выработанного пространства и в небольших количествах с обнаженной поверхности пород.

Различают *обыкновенное, суфлярное и внезапное* выделения метана.

2.4.1. Обыкновенное выделение метана

Обыкновенное *выделение метана* происходит *с обнаженной поверхности* угольного массива через мелкие (невидимые) трещины. Оно тем больше, чем выше газоносность и газопроницаемость угля, и газовое давление.

В первый период после вскрытия пласта выделение метана происходит весьма интенсивно (5…50 л/мин с 1 м^2 обнаженной поверхности пласта). Затем интенсивность выделения метана быстро уменьшается и через 6…12 месяцев оно практически прекращается.

Выделение метана с обнаженной поверхности пласта зависит также от производственных процессов, изменяющих условия дегазации массива. Например, при отбойке угля и бурении скважин возможно значительное выделение метана вследствие быстрого обнажения почти недегазированных участков пласта. Поэтому ПБ требуют, чтобы на участках с абсолютной метанообильностью 3 м^3/мин и более, а также в условиях пластов, опасных по внезапным выбросам и суфлярным выделениям метана (т.е. в условиях, когда обнажение мало дегазированных участков пласта может привести к значительному увеличению выделения метана), в очистных выработках у комбайнов и врубовых машин должен осуществляться автоматический контроль содержания метана. При обнаружении у комбайнов, врубовых машин и буровых станков концентрации метана 2% и более необходимо прекратить работу машин и подачу напряжения на питающий электрический кабель. Возобновление работы машин допускается лишь после снижения концентрации метана до 1%.

Значительно увеличивается выделение метана при отбойке угля взрывным способом вследствие быстрого обнажения и дробления мало дегазированного массива угля. При использовании отбойных молотков заметного повышения выделения метана не наблюдается.

Газовыделение из отбитого угля наблюдается в основном при его отделении от массива и погрузке. Вследствие того, что отбивается, как правило, уже значительно дегазированный уголь, его газоносность небольшая. Это обстоятельство и относительно небольшая крупность кусков угля обусловливают быстрое затухание газовыделения.

Газовыделение при транспортировании угля невелико. По истечении 10-12 ч газовыделение из отбитого угля практически прекращается. Остаточная газоносность (некоторое не выделившееся количество газа) для большинства углей находится в пределах 2…5 $м^3$/т. Однако в условиях сплошной конвейеризации шахт следует ожидать увеличения газовыделения из отбитого угля на свежих струях из-за большого пути транспортирования.

Из выработанного пространства метан выделяется в призабойное пространство очистных забоев, вентиляционные штреки лав и в выработки, находящиеся за пределами участков, при их примыкании к выработанному пространству.

Основные источники выделения метана в выработанное пространство:

– соседние угольные пласты (называемые сближенными, или пластами-спутниками);
– породы кровли;
– оставляемый в выработанном пространстве уголь;
– околоштрековые охранные целики.

При отработке угольного пласта сближенные угольные пласты частично разгружаются от давления. При этом часть сорбированного ими метана переходит в свободное состояние и по образующимся в междупластье трещинам перемещается в выработанное пространство разрабатываемого пласта.

В условиях пологих пластов метан поступает в выработанное пространство разрабатываемого пласта со всех лежащих выше угольных пластов, залегающих от разрабатываемого пласта на расстоянии, равном не более 130-кратной вынимаемой мощности пласта при полном обрушении кровли и не более 55-кратной вынимаемой мощности при полной закладке. Расстояние до лежащих ниже пластов, отдающих метан, находится в пределах 35…60 м при пологом падении и не более 70-кратной вынимаемой мощности пласта при крутом.

Метановыделение из выработанного пространства на какой-либо участок вентиляционного штрека равно разности переносимого воздухом количества метана в начале и конце этого участка. По мере удаления от лавы оно уменьшается вследствие уплотнения обрушенных пород в выработанном пространстве, восстановления горного давления на соседних пластах, частичной их дегазации и десорбции метана. Выделение метана из выработанного пространства увеличивается при резком падении атмосферного давления вследствие расширения газа.

Кроме выделения метана в горные выработки, зафиксированы случаи его поступления в помещения на поверхности, расположенные на выходах трещиноватых пород. Борьба с такими выделениями метана может вестись отсасыванием его через скважины с поверхности и нагнетанием цементного раствора в трещины.

2.4.2. Суфлярное выделения метана

Внезапные выделения газа из трещин и полостей, образовавшихся в результате тектонических процессов в массиве горных пород, называются *суфлярными* выделениями (суфлярами) геологического происхождения.

Внезапное выделение газа при вскрытии суфляров может произвести к загазированию выработок, вследствие чего создается взрывоопасная ситуация. Кроме того, недостаток кислорода, возникающий при загазировании выработок, вызывает удушье людей, находящихся в выработке.

Суфлярные выделения газа происходят во всех газоносных угледобывающих районах в очистных, капитальных и подготовительных выработках, проводимых по породам и по углю, на пластах пологого, наклонного и крутого залегания.

Продолжительность газовыделения при суфлярных выделениях составляет от нескольких часов до нескольких лет, а дебит достигает 7500-8500 $м^3$ в сутки. Газы из суфляров по составу в основном метановые. Одновременно с газом при суфлярном выделении может выделяться вода. Минимальная глубина от поверхности суфлярных выделений газа составляет 20-25 м. Суфляры наблюдались в зоне газового выветривания, т.е. выше границы метановых газов.

Около 90% суфлярных выделений газа произошло в капитальных и подготовительных выработках и лишь около 10% – в очистных. Интенсивность суфлярных выделений газа выше в очистных выработках. Плотность суфлярных выделений газа с увеличением глубины горных работ на современных глубинах возрастает. В связи с тем, что с увеличением глубины горных работ число геологических нарушений снижается, следует ожидать и соответственно уменьшения плотности суфлярных выделений.

Увеличение с ростом глубины газоносности в угольных пластах и вмещающих породах способствует аккумуляции газа в разного рода ловушках, чем объясняется влияние глубины на плотность и интенсивность суфлярных выделений.

Суфляры приурочены к пликативным (42%), дизъюнктивным (46%) нарушениям горного массива. Пликативные нарушения, в которых происходят суфлярные выделения газа, представляют собой флексуры или антиклинальные и синклинальные изгибы пород по простиранию или падению шириной и длиной до 1,0-2,0 км с амплитудой, не превышающей нескольких десятков метров. Эти нарушения образовались в результате вторичного тектогенеза на фоне крупных складок. Минимальный изгиб пликативных нарушений (отношение высоты складки к ее длине), при которой происходят суфлярные выделения газа, составляют 1/50 для антиклинальных складок и 1/35 для синклинальных. В антиклинальных складках с величиной изгиба от 1/50 до 1/35 суфляры происходят в своде складки, при величине изгиба от 1/35 до 1/10 – как в своде, так и в основании, при изгибе свыше 1/10 – как правило, в основании складки. В синклинальных складках суфляры происходят только в седловине. При непосредственной кровле пласта, представленной известняками, суфлярное выделение газа происходит и при величине изгиба пликативного нарушения менее 1/50 и воз-

никает в основании складок.

Суфлярные выделения газа в дизъюнктивных нарушениях происходят в надвигах и сбросах, не имеющих выходов на поверхность, либо в самих нарушениях, либо на расстоянии не более 20 м от них. При увеличении амплитуды нарушения расстояние от смещения до места расположения суфляров возрастает. Чаще суфляры встречаются в мелко амплитудных нарушениях, являющихся апофизами крупных нарушений.

Суфляры происходят при давлении газа в нарушениях не менее 0,2 МПа. Величина трещинообразования зависит от физико-механических свойств горных пород в районе геологических нарушений, что свидетельствует о наличии связи суфлярных выделений газа с литологическим составом пород. Повышенной склонностью к трещинообразованию обладают упругие породы. В известняках могут образовываться большие полости вследствие их выщелачивания. Коллекторами газа могут быть трещиноватые зоны, которые широко развиты в песчаниках начального катагенеза (марки Ж, К, ОС), известняках, угольных пластах.

Суфляры геологического происхождения по площади пластов расположены не равномерно и представляют собой различно ориентированные зоны, тесно связанные с ориентировкой геологических нарушений. Зоны суфлярных выделений имеют протяженность от нескольких десятков до нескольких тысяч метров по простиранию и падению пластов. Суфлярные выделения ориентированы в основном вкрест простиранию пластов. Зональное проявление суфляров наблюдается не только в пределах шахтных полей, но и в пределах месторождений.

Суфлярные выделения газа могут происходить из трещин и пустот, возникающих при ведении горных работ. Эти суфлярные выделения называются эксплуатационными суфлярами. Эксплуатационные суфляры возникают вследствие осадки основной кровли, разгрузки пласта и пород от горного давления, образования трещин в результате опорного давления в районе целиков или створе горных работ.

Эксплуатационные суфляры, образовавшиеся в результате осадки основной кровли, происходят в вентиляционных штреках и в верхних частях лав при трудно обрушающихся породах кровли. В этих случаях дебит газа большой, но продолжительность газовыделения, как правило, не превышает 20-25 суток. Интенсивность сдвижения пород кровли на пластах крутого залегания меньше, чем на пологих, поэтому суфляры при осадке пород кровли на этих пластах не наблюдаются.

Суфляры, возникающие вследствие разгрузки угольных пластов и пород от горного давления, наблюдаются в тех случаях, когда в почве или кровле выработки на небольшом расстоянии залегают угольные пласты, пропластки или газоносные породы. Метан в этих случаях поступает в выработку вследствие деформации пород и образования в них трещин при наличии в кровле прослойков и пластов на расстоянии не более 10 м и в почве – не более 5 м, а при наличии в почве пучащих пород – до 15 м.

Газ, выделяющийся при суфлярных выделениях, в основном состоит из

метана и тяжелых углеводородов. Содержание высших гомологов метана с увеличением глубины залегания угольных пластов возрастает. Содержание метана при суфлярных выделениях газа составляет 80-95%. Иногда в выделяющемся газе содержится в небольших количествах гелий. Незначительные количества гелия в составе газа, выделяющегося при суфлярах, свидетельствует о том, что источником суфляров являются пласты и пропластки, залегающие на небольшом расстоянии от выработок, и подтока газа из больших глубин не происходит.

Таким образом, условия проявления суфлярных выделений газа (природа суфляров) определяются наличием газа под большим давлением в трещинах и полостях, образовавшихся в массиве горных пород, вследствие тектонических процессов, происходивших в земной коре или при ведении горных пород.

Механизм суфлярного выделения газа представляет собой свободное истечение газа, находящегося под давлением, из трещин и полостей в массиве горных пород при их вскрытии горными выработками или скважинами.

Показателем плотности суфляров является их число на 1000 м длины выработки

$$R = \frac{n \cdot 1000}{l_{пл}},$$

где n – число суфляров за рассматриваемый период; $l_{пл}$ – общая длина выработок, проведенная по пласту, м.

Показатель R возрастает с увеличением глубины работ.

Интенсивность суфляров обычно составляет 5…6 м^3/мин и в редких случаях достигает 15…17 м^3/мин.

Все шахты, на которых имеют место суфлярное выделение метана, относятся к сверхкатегорным шахтам вне зависимости от метанообильности разрабатываемых пластов. К опасным по суфлярам относится полностью вся шахта, а не только отдельные пласты, на которых имеет место суфлярное выделение метана.

2.4.3. Внезапное выделение метана. Газодинамические явления в шахтах

При ведении горных работ в шахтах происходят различные *газодинамические явления*:

– внезапные выбросы угля и газа;

– обрушения (высыпания) угля;

– выдавливания (отжимы) угля;

– горные удары;

– выбросы породы и газа;

– прорывы газа из почвы выработок.

Эти явления создают различные опасности в шахтах, ухудшают технико-экономические показатели горных работ.

Некоторые газодинамические явления, имеющие различную природу и

механизм, иногда очень трудно различить по внешним признакам.

Для надежного прогнозирования и предотвращения этих явлений необходимо располагать сведениями о предупредительных и внешних их признаках, знать их природу и механизм, а также иметь достоверную классификацию явлений для правильного их распознавания.

Природа и механизм некоторых газодинамических явлений довольно хорошо изучены (например, обрушения пород и угля). По поводу природы и механизма внезапных выбросов угля, породы и газа, внезапных поднятий пород почв в горных выработках и некоторых других явлений до настоящего времени нет единого мнения.

Во многих странах мира на шахтах происходят внезапные выбросы угля и газа, песчаников и газа, калийных солей и газа, а при сооружении тоннеля Арпа-Севан в Армении имели место выбросы порфиритов и газа. Уголь, песчаники, калийные соли и порфириты существенно различаются по своим физико-механическим свойствам. Общим для всех выбросоопасных пород и угля являются высокие упругие свойства и наличие газа в поровом пространстве.

Много общего в геологических и горнотехнических условиях проявления выбросов угля, породы и газа. Внешние признаки выбросов, происшедших в угольных пластах, калийных солях, песчаниках и порфиритах имеют общие черты: характер их измельчения, образование полостей в массиве горных пород, выделение газа из измельченного материала, перемещение измельченных угля и пород в газовом потоке по выработкам, расположение разрушенного материала в выработке под углом меньше угла естественного откоса, характер нарушения крепи и оборудования в выработках и т.п.

Некоторые исследователи считают, что природа и механизм выбросов у угля, калийных солей, песчаников и порфиритов едины, несмотря на существенные различия физико-механических свойств них.

При этом выброс рассматривался как спонтанный, быстро протекающий процесс хрупкого самоподдерживающегося разрушения призабойной части массива горных пород, сопровождающийся газовыделением из разрушенных угля и пород и перемещением их по выработкам в газовом потоке.

Внезапному выбросу предшествуют *предупредительные признаки*:

- удары, толчки и гул в массиве;
- выдавливания угля из забоя;
- отскакивание кусочков угля и шелушение забоя;
- изменение прочности угля;
- усиление давления на крепь;
- появление пылевого облака;
- повышение газовыделения;
- зажатие бурового инструмента;
- выброс штыба и газа при бурении скважин.

Предупредительные признаки могут иметь слабовыраженный характер или вовсе отсутствовать.

Первый выброс угля и газа произошел на шахте «Исаак» во Франции в

бассейне Лауры. Несколько позже выбросы угля и газа были зарегистрированы в Бельгии. В Украине первый выброс угля и газа отмечен в Донбассе в 1906 г. Выбросы угля и газа имеют место в Англии, Японии, Польше, Венгрии, Германии, Китае и других странах. Минимальная глубина, на которой происходили выбросы угля и газа составляет 120-150 м.

Выбросы угля и газа происходят в весьма разнообразных условиях: на угольных пластах различной степени метаморфизма и мощности, при различных углах залегания, при вскрытии угольных пластов и при их разработке, в очистных и подготовительных выработках, при различных способах выемки угля (буровзрывном, механическом, гидравлическом и ручном).

Выбросы угля и газа происходят на угольных пластах различного петрографического состава. Выбросоопасные пласты сложены наиболее хрупкими углями. Выбросы угля и газа происходят в угольных пластах марок Г, Ж, К, ОС, Т и А.

Выбросоопасные зоны на выбросоопасных угольных пластах имеют локальный характер. Среднестатистическая площадь выбросоопасных зон составляет 5-10% от общей площади выбросоопасного шахтопласта. Вид, расположение полостей выбросов угля и газа приведены на рис. 2.2.

Внезапные выбросы угля и газа приурочены к зонам геологических нарушений. С усложнением тектонического строения шахтного поля, развитием мелких пликативных и дизъюнктивных нарушений опасность по выбросам возрастает. Наиболее опасными зонами являются участки 10-20 метровой ширины по обе стороны от дизъюнктивного нарушения (рис. 2.2, а).

Установлено, что обычно внезапные выделения приурочены либо к зонам геологических нарушений, либо к зонам, лежащим в непосредственной близости к таковым.

Внезапные выбросы метана представляют собой практически мгновенное концентрированное выделение метана (до десятков тысяч кубических метров), сопровождающееся быстрым загазированием выработок. Атмосфера в выработках становится не только взрывоопасной, но и непригодной для дыхания.

Внезапные выбросы метана обычно происходят совместно с выбросами угля. При внезапном выбросе выработка заполняется угольной мелочью и газом на десятки и сотни метров от забоя. В пласте при этом образуются пустоты различной формы.

Внезапные выбросы с физической точки зрения представляют собой сложное явление, характеризующееся совместным воздействием различных факторов. Комплексное влияние факторов физико-механического, физико-химического, горно-геологического и горнотехнического характера таково, что установить определяющие взаимосвязи какого-либо из них с опасностью выброса невозможно, так как все эти взаимосвязи обладают малой надежностью. Однако вполне очевидно, что метан является одним из основных источников энергии при разрушении угля и пород и в дальнейшем развитии процесса выброса.

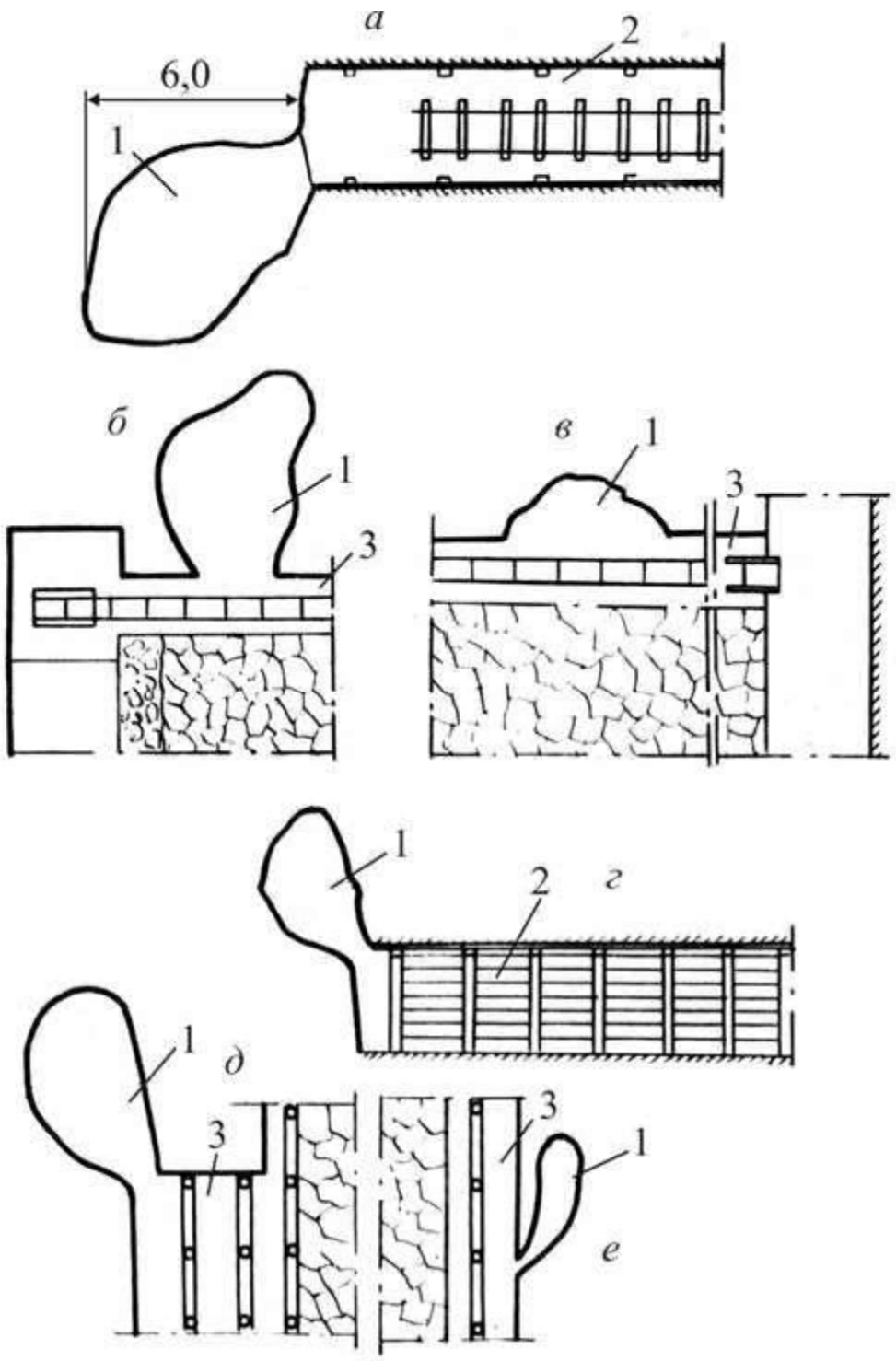


Рис. 2.2. Вид полостей выбросов: *а* – в подготовительной выработке на пологом пласте; *б*, *в* – в очистных выработках на пологих пластах; *г* – в подготовительной выработке на крутом пласте; *д*, *е* – в очистных выработках на крутых пластах; 1 – полость; 2 – подготовительная выработка; 3 – очистная выработка

Около 50% угольных пластов в Донбассе опасны по внезапным выбросам. Большинство выбросов (80…90%) происходят на выемочных участках. Внезапные выбросы бывают умеренные, сильные и мощные. Количество уме-

ренных выбросов в Донбассе составляет до 90% от общего их количества и при этом выброс угольной массы составляет до 200 т. Сильные выбросы (до 7%) – это внезапные выбросы с выбросом угольной массы 200…500 т. При мощных выбросах (до 2%) выбрасывается 500 т и более угольной массы. В среднем на каждую тонну угля выбрасывается 46 м^3 метана (максимально – 233 м^3/т). Дальнобойность внезапного выброса в среднем составляет 35 м (максимальная – 90 м).

Измерить величину газовыделения при внезапных выбросах прямым образом обычно невозможно, поэтому об объеме выделившегося метана судят по массе выброшенного угля и его примерной газоносности в зоне выброса, а также на основе оперативного определения динамики поступления метана в исходящую струю после выбросов.

При внезапном выбросе:

- горная выработка засыпается измельчённым углём;
- выводимся из строя оборудование;
- деформируется крепь;
- обрушаются горные породы;
- горная выработка заполняется метаном.

При этом возможны взрывы метана, что связано с разрушением электрических кабелей и возникновением электрической дуги в месте короткого замыкания, а также с возникновением искр вследствие ударов металлических предметов по горным породам.

Различают шахты, опасные по внезапным выбросам и угрожаемые по внезапным выбросам. К опасным по внезапным выбросам относятся шахты, в пределах шахтного поля которых на данном или нижележащем горизонте произошёл выброс. К угрожаемым по внезапным выбросам относятся шахты, на которых на данном горизонте произошёл выброс на смежной (соседней) шахте.

Относительная величина газовыделения из выброшенного угля в процессе выброса по данным ВостНИИ, полученным для 55% происшедших выбросов, составляет: для 10% выбросов – до 20 м^3/т, для 10% – 20…50 м^3/т, для 35% – более 50 м^3/т.

Количество метана, выделяющееся при выбросе, может достигать 50 тыс. м^3 и более, а количество горной массы – 15 тыс. т.

На территории СНГ наиболее опасны по внезапным выбросам угольные пласты в Донбассе, где происходит свыше 85% всех выбросов (в 1973 г. на шахте им. Ю.А. Гагарина при выбросе выделилось до 180 тыс. м^3 метана и было вынесено в выработку до 14 тыс. т угля). Примерно такой же объем газа был зафиксирован при внезапном выбросе на шахте «Северная» в Печорском бассейне, а на шахте «Коксовая» в Кузбассе было выброшено свыше 60 тыс. м^3 газа. Количество выброшенной породы при внезапном выбросе на шахтах СНГ достигает 50 м^3 (Воркута).

Внезапные выбросы обычно происходят при вскрытии опасных пластов и пересечении зон геологических нарушений. В самом пласте выбросы угля и газа приурочены чаще к участкам пласта или пачкам угля, имеющим понижен-

ную прочность и слабый контакт с вмещающими породами. Опасность выбросов увеличивается с повышением газоносности пластов, т.е. с увеличением глубины горных работ.

Развитию внезапных выбросов способствуют сотрясения, вызываемые работой ударных инструментов, взрывные работы, появление зон концентрации напряжений (в острых углах и уступах).

Внезапные выбросы, как правило, под действием горного давления вызывают разрушения больших участков пласта, прилегающих к плоскостям обнажений. При этом происходит быстрое перемещение зоны опорного давления вглубь массива. Участки пласта, ранее находившиеся за пределами зоны опорного давления (и вследствие этого почти не дегазированные), разгружаются от давления и разрушаются, в результате чего сорбированный углем газ быстро переходит в свободное состояние и интенсивно выделяется в выработку.

При больших значениях газоносности и газового давления освобождающаяся в процессе десорбции энергия газа и потенциальная энергия состояния пласта на рассматриваемом участке могут вызвать дробление угольного массива и вынос в выработку значительного количества угля. При движении угля в направлении действия силы тяжести в вертикальных пустотах вероятность развития выброса повышается.

Таким образом, основными факторами, влияющими на возникновение внезапного выброса, являются горное давление, энергия заключенного в угле газа, физико-механические свойства угольного пласта. Близки к внезапным выбросам по своему характеру газовыделения, связанные с внезапным выдавливанием угля из забоя и с его высыпанием. Однако их интенсивность и опасность во много раз меньше, чем внезапных выбросов.

2.5. Газовый баланс шахты

Газовый баланс шахты – распределение выделения газа по отдельным источникам или по системе выработок. Определяется совокупностью горно-геологических и горнотехнических условий (системой разработки, способом управления кровлей, наличием пластов-спутников, объемом выработанного пространства, развитием очистных и подготовительных работ, газоносностью пласта, свойствами угля и др.)

Газовым балансом шахты называется также ее абсолютная метанообильность, представленная суммой метанообильностей источников метановыделения.

Основные источники выделения метана в современных шахтах:

в очистных забоях – поверхность забоя, отбитый уголь, сближенные угольные пласты, вмещающие породы;

в подготовительных забоях – стенки выработки, поверхность забоя, отбитый уголь;

в откаточных штреках выемочных участков – стенки выработки и транспортируемый уголь;

в вентиляционных выработках за пределами выемочных участков – выработанные пространства, целики угля.

Знание газового баланса шахты необходимо для правильной организации ее вентиляции (для определения необходимого количества воздуха и его распределения по выработкам).

Газовый баланс шахт определяется расчетом или прямыми измерениями распределения газовыделения.

Применяемый в настоящее время метод прогноза метанообильности выработок позволяет определить величину метановыделения:

1) на выемочном участке – из разрабатываемого пласта, из сближенных пород;
2) в подготовительных выработках – с обнаженных поверхностей и из отбитого угля;
3) за пределами выемочных участков – из выработанных пространств ранее отработанных этажей.

Это дает возможность определить метанообильность выемочных участков и шахтопластов в целом.

Прямые измерения газового баланса осуществляются методом газовоздушных съемок. При таких съемках определяется обычно газовыделение в отдельных выработках или их системах.

Основными составляющими частями газового баланса шахты является газовыделение:

- в выработки выемочных участков;
- в обособленно проветриваемые выработки;
- в вентиляционные выработки из выработанных пространств ранее отработанных этажей;
- в воздухоподающие выработки.

В количественном отношении в газовом балансе шахты основное место принадлежит газовыделению на выемочных участках, которое в свою очередь складывается из значений газовыделения в отдельные выработки участка из различных источников.

Для более дифференцированной оценки газовыделения составляют также газовый баланс выемочного участка.

2.6. Категории шахт по метану

Метанообильность – количество метана, выделяющегося в выработки шахты.

Абсолютная метанообильность выработки (шахты) – количество метана, выделяющегося в единицу времени (измеряется обычно в $м^3$/мин или $м^3$/сут).

Относительная метанообильность выработки (шахты) – количество метана, выделяющегося на 1 т добываемого угля (измеряется в $м^3$/т).

Относительная метанообильность является количественным показателем опасности шахт по газу.

Шахты, в которых было отмечено выделение метана в выработки, отно-

сятся к опасным по газу и в зависимости от относительной метанообильности и вида выделения метана подразделяются на пять категорий (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Категории шахт по метану

Категория шахт	Относительная метанообильность, $м^3/т$ и вид выделения
I	до 5
II	от 5 до 10
III	от 10 до 15 и шахты, где были случаи местных (слоевых) скоплений, воспламенений или взрывов метана
сверкатегорийные	15 и более; шахты опасные по суфлярным выделениям
опасные по внезапным выбросам	шахты, ведущие работы по пластам, опасным по внезапным выбросам угля и газа, шахты с выбросами породы

Относительная метанообильность (углекислотообильность) шахты ($м^3/т$), устанавливаемая ежегодно в январе по результатам ежемесячных замеров газа в шахте (выполненных в течение года).

Категория шахты устанавливается по максимальной относительной метанообильности участка, крыла, горизонта, пласта или шахты в целом.

Интенсификация добычи и увеличение глубины шахт вызывают возрастание их метанообильности. В настоящее время относительная метанообильность отдельных шахт составляет 100…140 $м^3/т$ более.

2.7 Допустимое содержание метана в атмосфере горных выработок

Для обеспечения безопасных условий работы в газовых шахтах содержание метана в выработках должно быть значительно меньше нижнего предела взрывчатости метановоздушной смеси, равного 5%.

По ПБ содержание метана в атмосфере подземных выработок и трубопроводах не должно превышать значений, приведенных в табл. 2.2.

Под выемочным участком понимается обособленно проветриваемая очистная выработка и прилегающие к ней подготовительные выработки.

При контроле содержания метана в исходящих вентиляционных струях участков угольных шахт стационарными автоматическими приборами последние должны обеспечивать отключение электроэнергии при содержании метана 1,3% и более.

Допустимое содержание метана значительно ниже среднего предела его воспламенения, что гарантирует безопасность работ. Более высокое допустимое содержание метана (2%) при его местных скоплениях объясняется в определенной степени их меньшей опасностью вследствие относительно небольших объемов содержащегося в них метана.

Таблица 2.2.

Предельно-допустимое содержание метана в атмосфере горных выработок

Наименование мест измерения	Недопустимая концентрация CH_4, % по объему
Поступающая на выемочный участок, в очистные выработки, к забоям тупиковых выработок и в камеры	более 0,5
Исходящая из тупиковой выработки, камеры, поддерживаемой выработки	более 1,0
Исходящая из очистного забоя, выемочного участка при отсутствии аппаратуры автоматического контроля метана (АКМ)	более 1,0
Исходящая из очистного забоя, выемочного участка при наличии аппаратуры АКМ	1,3 и более
Исходящая крыла, шахты	более 0,75
Местное скопление метана в очистных, тупиковых и других выработках	2,0 и более
На выходе из камер смешивания	2,0 и более
Трубопроводы для изолированного отвода метана при помощи вентиляторов (эжекторов)	более 3,5
Дегазационные трубопроводы	от 3,5 до 25,0

При установлении допустимого содержания метана для струй, исходящих из крыла или шахты, учтено разбавление метана утечками воздуха за пределами участков.

Ограничение допустимого содержания метана в поступающих струях необходимо для обеспечения безопасности работ и возможности увеличения нагрузки на очистной забой.

2.8. Меры борьбы с метаном средствами вентиляции

Основным мероприятием, обеспечивающим предотвращение опасных скоплений метана, является вентиляция, которая считается эффективной только при условии, что по всей сети выработок шахты поддерживается допустимое содержание метана.

Основные меры по борьбе с метаном:

1) увеличение количества поступающего в шахту и на отдельные ее участки воздуха за счет уменьшения аэродинамического сопротивления горных выработок;
2) распределение воздуха по выработкам в соответствии с их газовым балансом;
3) уменьшение утечек воздуха в шахте, так как они приводят к уменьшению воздуха, подаваемого к местам его основного потребления;

4) использование мероприятий по усилению перемешивания воздушного потока при слоевых скоплениях метана в пределах слоя;
5) исключение в тупиковых выработках явления рециркуляции воздуха (когда вентилятор засасывает загрязненный метаном воздух и вновь подает его в забой), при котором в забое может накапливаться метан и содержание его может превысить допустимое. Чтобы избежать рециркуляции воздуха, необходимо надежно отделять свежую струю от исходящей (располагать вентилятор или конец всасывающего трубопровода только на свежей струе).
6) надежное изолирование движущегося по сквозным выработкам загрязненного воздуха от свежей струи, поступающей к местам ведения работ;
7) применение восходящего проветривания в очистных забоях, где метан выделяется наиболее интенсивно при угле падения пласта более 10°;
8) применение нисходящего проветривания в очистном забое только при использовании схем вентиляции с дополнительной подачей свежего воздуха по выработке, примыкающей к очистному забою на нижнем горизонте;
9) поддержание скорости движения воздуха в очистных и подготовительных выработках не ниже минимально допустимой (0,25 м/с), при которой возможно достаточно интенсивное перемешивание метана в вентиляционном потоке;
10) применение в тупиковых забоях газовых шахт только нагнетательного способа проветривания, при котором вентиляторы постоянно омываются свежим воздухом;
11) вентиляция в газовой шахте должна быть непрерывной, и даже кратковременная остановка вентиляторов недопустима;
12) вентиляционная сеть шахт должна состоять из возможно большего числа независимых участков, а свежие и исходящие струи должны быть надежно разделены.

Переходные газодинамические процессы при регулировании воздухораспределением в шахтной сети

Режим проветривания шахты – это быстротекущие процессы установления давления, переходные аэродинамические процессы по дебиту воздуха и переходные газодинамические процессы по дебиту метана. При этом доминирующим фактором в обеспечении безопасных условий труда является содержание метана в атмосфере очистного забоя и на исходящей струе участка, которое определяется отношением выделившегося метана к дебиту воздуха.

Установившееся практика подачи завышенного общешахтного количества воздуха, рассчитанного на максимально возможное выделение газа на участках, экономически нецелесообразна и во многих случаях технически не осуществима, в связи с чем возникает необходимость регулировать дебит воздуха в шахтной вентиляционной сети по газовому фактору. Изменение аэродинамических параметров регулирующих устройств вызывают переходные процессы в шахтной вентиляционной сети.

При этом в исходящих струях участков при резком регулировании расхо-

да воздуха отмечен парадоксальный факт: резкое увеличение количества воздуха сопровождается в определённых условиях таким же резким повышением не только дебита, но и концентрации метана, которая изменяется в обратно пропорциональной зависимости лишь через некоторое время. Другими словами резкий рост расхода воздуха на выемочном участке с значения Q_1 до Q_2 (рис. 2.3) вызывает всплеск концентрации метана на исходящей струе на ΔC от установившегося значения c_1. Новое установившееся значение c_2 достигается через некоторое время T, которое может исчисляться часами.

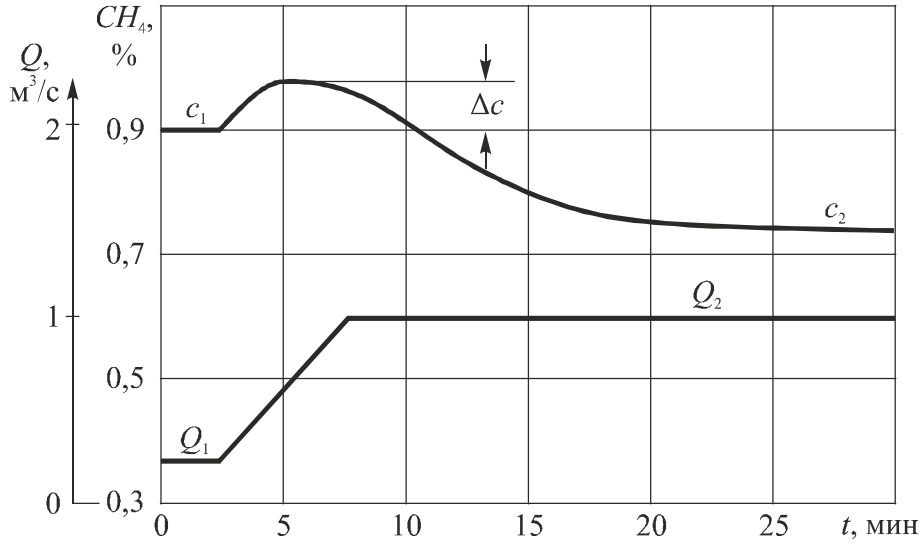


Рис. 2.3. Изменение концентрации метана при регулировании расхода воздуха

Опасность этого явления заключается в том, что концентрация метана в исходящей струе участка даже при увеличении дебита воздуха может превысить предельно-допустимые значения.

Натурные эксперименты с различной глубиной регулирования расхода воздуха показали, что при изменении дебита воздуха на 20-25% переходной газодинамический процесс протекает плавно, без всплесков концентрации метана. Для более глубокого регулирования его следует разбить на соответствующее число ступеней с тем, чтобы изменяемый дебит воздуха отличался от предыдущего в пределах до 25%.

В последнее время наблюдается быстрый рост газообильности шахт вследствие увеличения их глубины и интенсификации добычи угля. При этом вентиляционные возможности шахт могут оказаться исчерпанными, что потребует осуществления специальных мероприятий по борьбе с метаном, из которых главным является дегазация шахт.

2.9. Дегазация шахт

Дегазация шахты – совокупность мер по извлечению шахтного метана из угольных пластов, вмещающих пород и выработанного пространства с последующим отводом его на поверхность или в горные выработки, в которых воз-

можно разбавление метана до безопасного содержания.

Объектом дегазации могут быть разрабатываемые пласты, сближенные пласты, вмещающие породы и выработанное пространство.

Критерием, определяющим необходимость проведения дегазации, является повышение метанообильности выработок I сверх допустимой по фактору вентиляции $I_{\text{вент}}$ (без дегазации), т. е. когда невозможно обеспечить содержание метана в воздухе в пределах норм, установленных ПБ.

Способы дегазации

В зависимости от методов воздействия на угленосную толщу с целью нарушения равновесия состояния системы «уголь-метан» различают следующие способы дегазации:

1) *физико-химический способ* – основан на нагнетании в пласты, склонные к увлажнению, специального раствора, который в порах затвердевает и блокирует в угле метан;

2) *микробиологический способ* – основан на принципе окисления метана в процессе жизнедеятельности некоторых видов бактерий; суть его состоит в нагнетании в пласт или выработанное пространство бактериальной суспензии в смеси с воздухом;

3) *физический способ* – наиболее распространен и основан на повышении газоотдачи пластов и пород посредством подработки или надработки толщи, разгрузки пласта выработками, скважинами, очистным забоем или использования энергии взрыва и давления воды с последующим улавливанием метана и отводом его на поверхность.

При правильном осуществлении способов дегазации поступление метана в шахтный воздух может быть снижено в зависимости от природных и горно-технических условий на 30…40% по шахте в целом и на 70…80% в пределах выработок выемочных полей. Это позволяет не только повысить безопасность ведения горных работ, но и внедрять при разработке газоносных угольных пластов новую высокопроизводительную технику. При осуществлении дегазации нагрузка на лаву может быть увеличена в 4…5 раз.

Эффективность дегазации оценивается коэффициентом эффективности дегазации, который для отдельного источника определяется по формуле

$$k_i = \frac{q_i - q_i^I}{q_i},$$

где q_i и q^I_i – относительный дебит метана из данного источника соответственно до дегазации и после осуществления ее, м^3/т.

2.9.1. Дегазация при проведении подготовительных выработок

*Дегазация при проведении полевых выработок***.**

Под пластом бурят скважины диаметром 80…100 мм, герметизируют их и подсоединяют к газопроводу при разрежении не менее 100 мм рт. ст.

(рис. 2.4.)

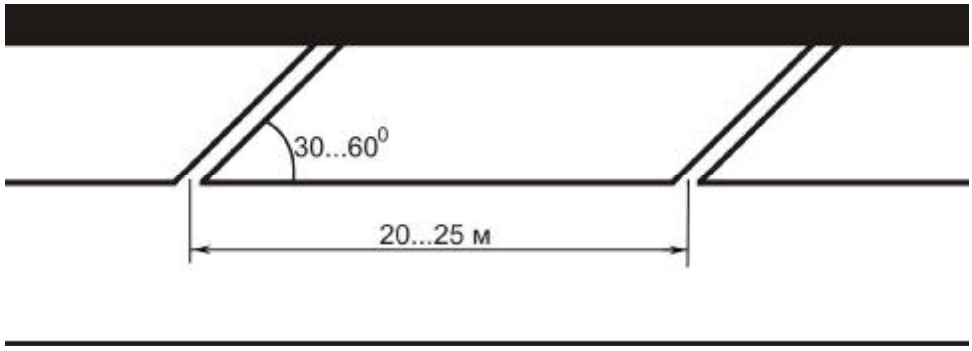


Рис. 2.4. Дегазация при проведении полевых выработок

При вскрытии газоносного пласта бурится 5…10 скважин диаметром 80…100 мм с таким расчетом, чтобы они пересекли газоносный пласт за пределами контура выработки (рис. 2.5).

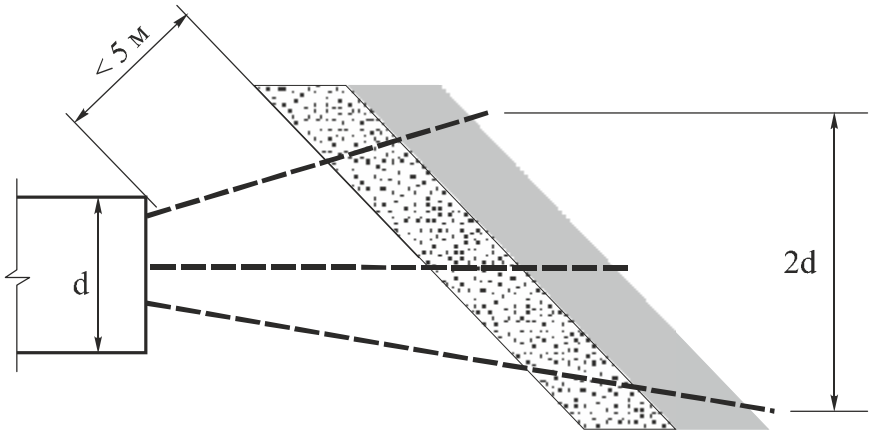


Рис. 2.5. Дегазация при вскрытии газоносного пласта

Выбросоопасный пласт вскрывается, когда давление газа снизилось до величины 10 кг/см^2.

При проведении выработок по угольному пласту бурят барьерные скважины диаметром 50…100 мм длиной 100…150 м (рис. 2.6).

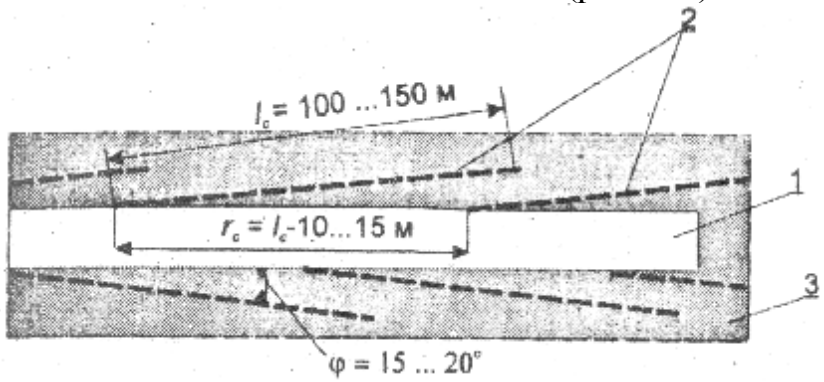


Рис. 2.6. Дегазация при проведении выработок по угольному пласту: 1 – пластовая выработка; 2 – дегазационные скважины; 3 – угольный пласт

Отсос газа из дегазационных скважин производится стационарными вакуум-насосными станциями (ВНС), установленными на поверхности, или пере-

движными дегазационными установками ПДУ, располагаемые в выработках со свежей струей. Метано-воздушная смесь при этом отводится в ближайшую выработку с исходящей струей.

2.9.2. Дегазация неразгруженных угольных пластов

Большей частью угольные пласты в природных условиях обладают малой газопроницаемостью и эффективность их дегазации низка. В зависимости от горнотехнических условий применяют следующие способы дегазации таких пластов.

Дегазация проведением подготовительных выработок по угольным пластам в процессе нарезки выемочных столбов и удалением метана за счет вентиляции до начала выемочных работ (перераспределение газовыделения). Коэффициент эффективности дегазации составляет 0,2…0,3. В случае заблаговременного проведения выработок, их изоляции и вывода метана по трубопроводам коэффициент эффективности дегазации составляет 0,3…0,5 (рис. 2.7).

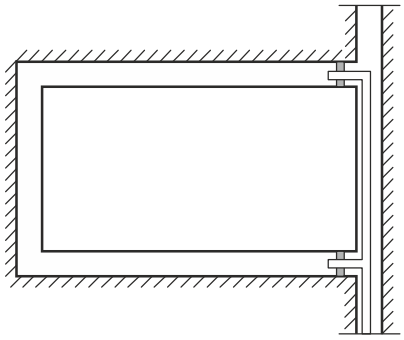


Рис. 2.7. Дегазация подготовительными выработками при столбовой системе разработки

Дегазация скважинами, пробуренными из выработок

Способ применяется как при столбовых, так и при сплошных системах разработки (рис. 2.8).

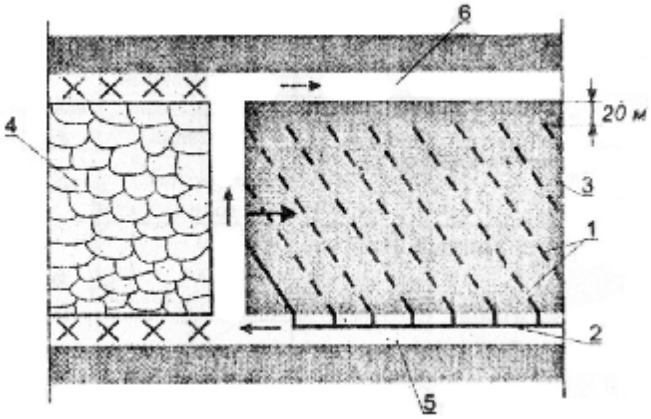


Рис. 2.8. Дегазация скважинами пробуренными из выработок: 1 – дегазационные скважины; 2 – участковый газопровод; 3 – разрабатываемый пласт; 4 – выработанное пространство; 5 – откаточный штрек; 6 – вентиляционный штрек

Возможно одиночно-параллельное или веерное расположение скважин (предпочтительно одиночно-параллельное). Диаметр скважин – 80…150 мм. Срок службы не менее 6 мес. Величина вакуума – не менее 7 кПа. Скважину отключают при подходе лавы до 2…5 м.

Коэффициент эффективности дегазации 0,2…0,3, а в особо благоприятных случаях, при высокой газопроницаемости пластов, достигает 0,4…0,5.

Дегазация скважинами с гидроразрывом пласта

Сущность способа состоит в увеличении газопроницаемости угля путем расширения существующих или создания новых трещин в пласте за счет нагнетания воды с последующей (после осушения) дегазацией пластов через эти же и пластовые скважины (рис. 2.9).

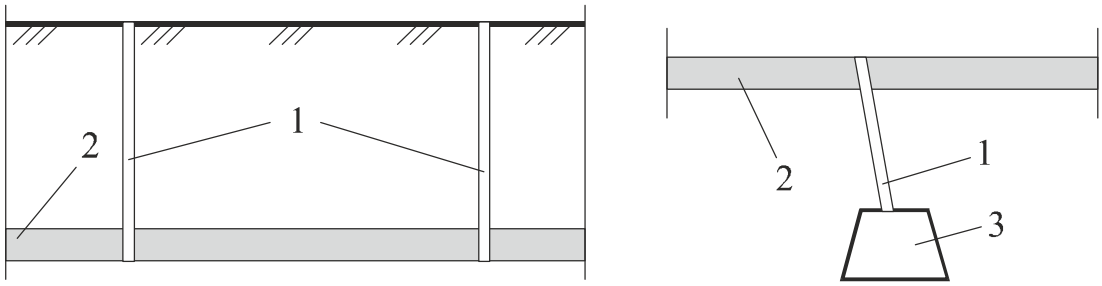


Рис. 2.9. Дегазация скважинами с гидроразрывом пласта: 1 – скважины гидроразрыва; 2 – угольный пласт; 3 – горная выработка

Жидкость нагнетается с поверхности или из подземных выработок. Давление воды – 15…20 МПа. Коэффициент эффективности дегазации при отсосе газа только из скважин гидроразрыва 0,1…0,2, а при бурении дополнительных дренажных скважин по угольному пласту в зоне гидроразрыва – 0,5…0,6.

2.9.3. Дегазация сближенных угольных пластов и вмещающих пород при их подработке и надработке

При частичной или полной разгрузке угольных пластов и пород от горного давления их газопроницаемость резко возрастает. Эффективность дегазации повышается по мере снижения мощности пород междупластья.

Дегазация сближенных пластов скважинами, пробуренными из подземных выработок.

Дегазация сближенных пластов скважинами – один из первых способов, нашедших широкое применение на шахтах (рис. 2.10, 2.11).

Сущность его состоит в том, что из выработок разрабатываемого пласта (обычно из штреков) в направлении сближенных пластов бурятся скважины, через которые с помощью трубопроводов и вакуум-насосов отсасывается метан.

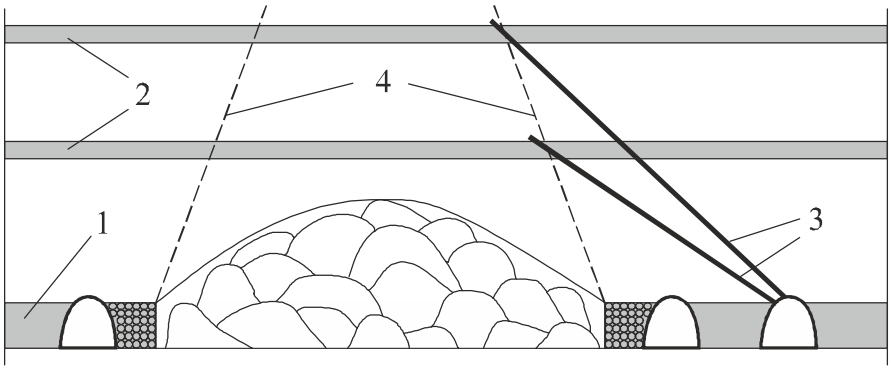


Рис. 2.10. Дегазация сближенных пластов скважинами, пробуренными из подземных выработок: 1 – разрабатываемый пласт; 2 – подрабатываемые пласты; 3 – дегазационные скважины; 4 – плоскость разгрузки массива от сил горного давления

Высокая эффективность дегазации достигается при правильном заложении скважин. Скважины бурятся до подхода к ним очистного забоя. При этом они должны пересекать сближенный пласт в зоне его разгрузки от горного давления и при подвигании лавы не попадать в зону активного обрушения.

Если скважина окажется в зоне разгрузки сближенного пласта, то дебит метана из нее будет высоким, так как при разгрузке пласта значительная часть ранее сорбированного метана переходит в свободное состояние.

Попадание скважины в зону активного обрушения приводит к нарушению целостности скважины и засасыванию из обрушенного пространства метано-воздушной смеси с небольшим содержанием метана, т.е. к снижению эффективности дегазации.

Расстояние между скважинами по простиранию зависит от периода их эффективного действия, расстояния до сближенного пласта, его мощности и марки угля, свойств пород междупластья, скорости подвигания лавы и изменяется в пределах 25…200 м.

Скважины должны иметь диаметр не менее 100 мм. Устье скважины имеет больший диаметр для цементации в нем металлической трубы, соединяющей скважину с магистральным газопроводом. Цементация устья позволяет уменьшить подсосы воздуха из выработки. К магистральному трубопроводу подключаются все действующие скважины, а сам трубопровод соединяется с вакуум-насосом, располагаемым на поверхности.

Максимальный дебит скважин наблюдается в период максимальной разгрузки сближенного пласта от давления. Затем он уменьшается и через несколько месяцев скважина истощается. Продолжительность периода целесообразного действия скважины достигает 10 мес.

Содержание метана в отсасываемой из скважин метано-воздушной смеси находится в пределах 60…100%, а ее максимальный дебит составляет 2…10 $м^3$/мин.

Дегазацию сближенных пластов скважинами целесообразно применять при газовыделении из них не менее 3 $м^3$/мин.

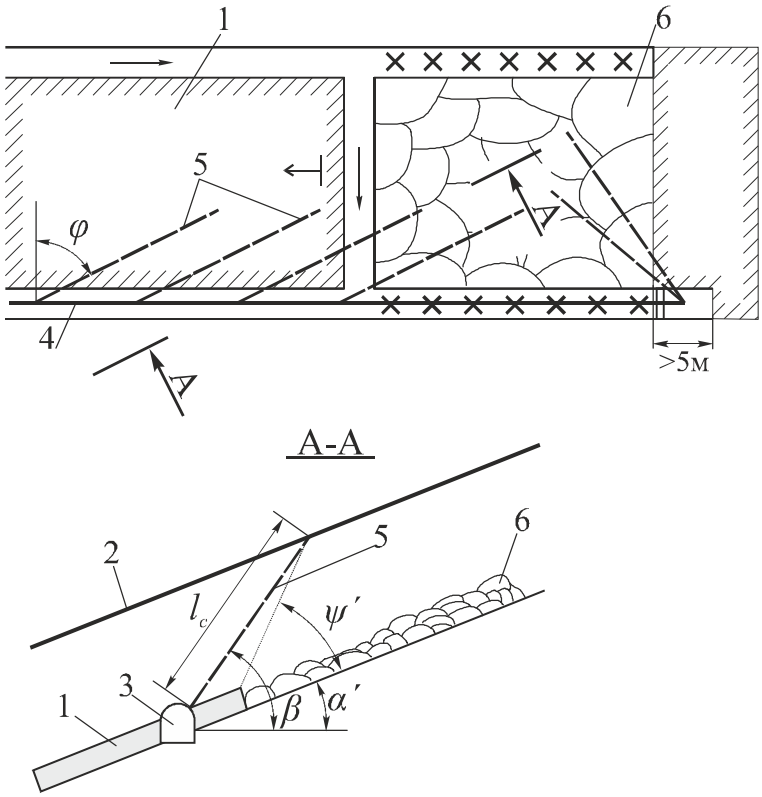


Рис. 2.11. Схема дегазации подрабатываемого пласта скважинами, пробуренными навстречу очистному забою и над монтажной выработкой: 1 – разрабатываемый пласт; 2 – подрабатываемый пласт; 3 – штрек; 4 – участковый газопровод; 5 – дегазационные скважины; l_c – длина скважины; ψ' и α' – проекции углов разгрузки пород кровли и залегания пласта на плоскость, которая проходит через ось скважины; β – угол наклона скважины к горизонту; φ – угол поворота скважины

Дегазация газосборными выработками

Выработка площадью поперечного сечения 3…4 м^2 проводится до начала очистных работ, закрывается перемычкой и подсоединяется к вакуум-насосу посредством трубопровода (рис. 2.12.). Способ применяется при весьма крепких породах между пластами.

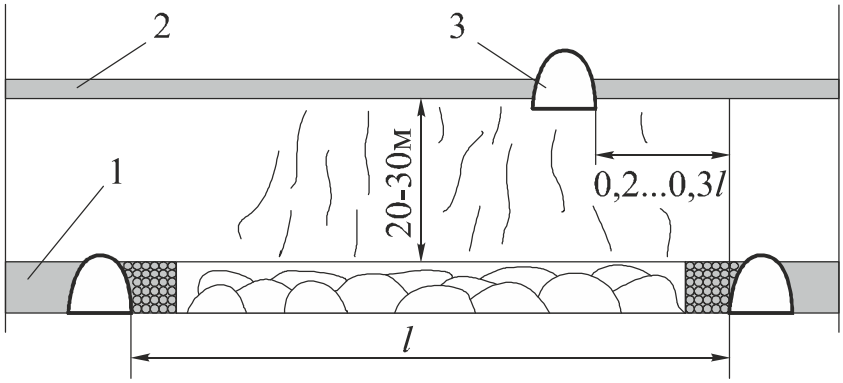


Рис. 2.12. Дегазация с применением газосборной выработки: 1 – разрабатываемый пласт; 2 – подрабатываемый пласт; 3 – газосборная выработка

Дегазация скважинами, пробуренными с поверхности

Способ (рис. 2.13.) рекомендуется при глубинах разработки до 500 м ($k_{дег}$ = 0,4…0,7; p = 20 кПа).

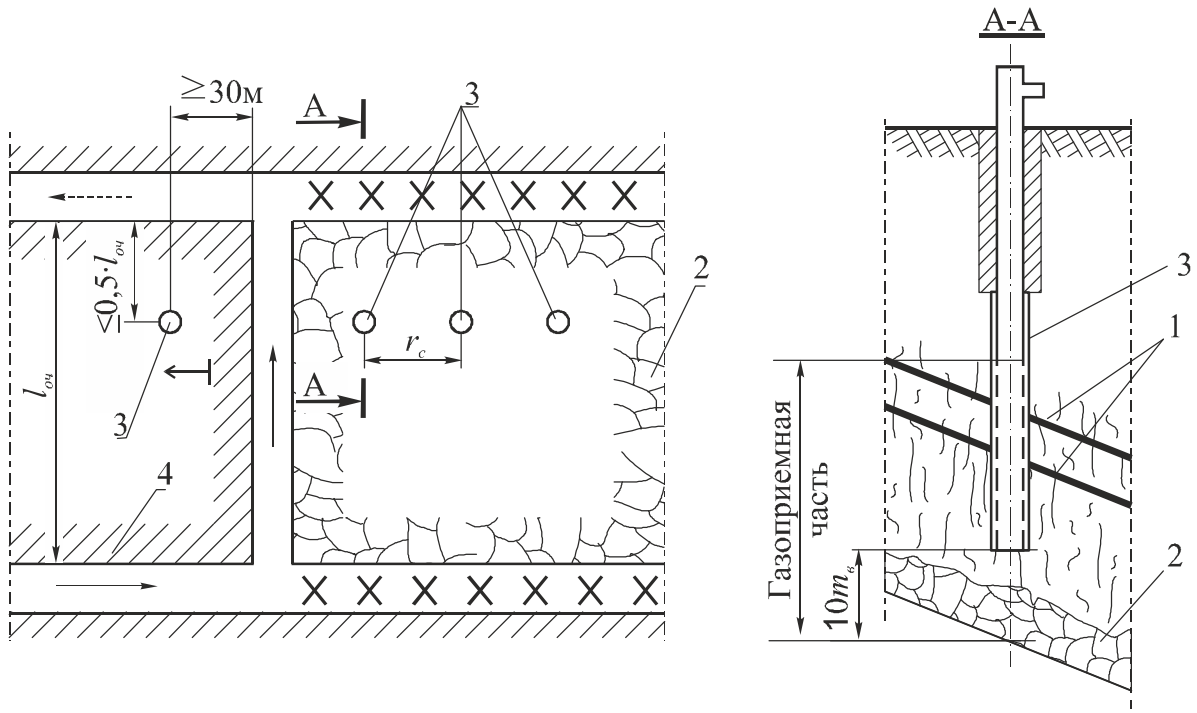


Рис. 2.13. Дегазация скважинами, пробуренными с поверхности: 1 – угольные пласты; 2 – выработанное пространство; 3 – дегазационные скважины

2.9.4. Дегазация выработанного пространства скважинами

Дегазация выработанного пространства действующих очистных участков применяется при значительном газовыделении из сближенных пластов, когда в верхней части лав наблюдается высокая концентрация метана (рис. 2.14.). Расстояние между скважинами составляет 20…30 м, разрежение на устье скважины – p = 3…6 кПа, $k_{дег}$ = 0,25…0,4.

Дегазация выработанного пространства может осуществляться также с помощью скважин, пробуренных с поверхности.

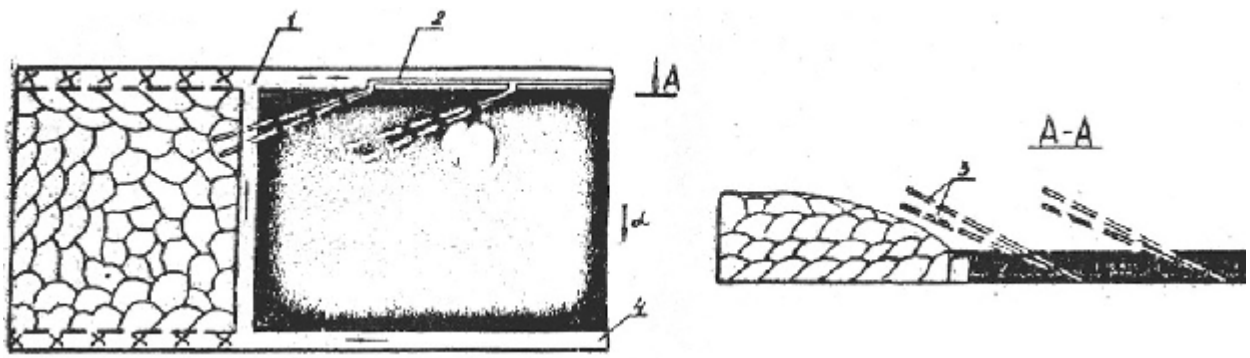


Рис. 2.14. Схема дегазации выработанного пространства скважинами, пробуренными над куполами обрушения: 1 – вентиляционный штрек; 2 – газопровод; 3 – дегазационные скважины

Отвод метана за пределы выемочного участка с помощью газоотводящих установок

Изолированный отвод метана из выработанного пространства рекомендуется применять, когда метановыделение из выработанного пространства составляет не менее 4м^3/мин.

Метан, отводимый за пределы выемочного участка, выпускается в выработку с исходящей вентиляционной струей после предварительного разбавления его воздухом в смесительной камере до норм ПБ.

В качестве газоотводящих установок применяются вентиляторы и эжекторы, устанавливаемые в камере, проветриваемой струей свежего воздуха. Содержание метана в трубопроводе должно быть не более 3,5%. Концентрация метана на выходе из смесительной камеры не должна превышать 2%.

При этом изолированнй отвод метана может применяться как при столбовой системе разработки (рис. 2.15), так и при сплошной (рис. 2.16).

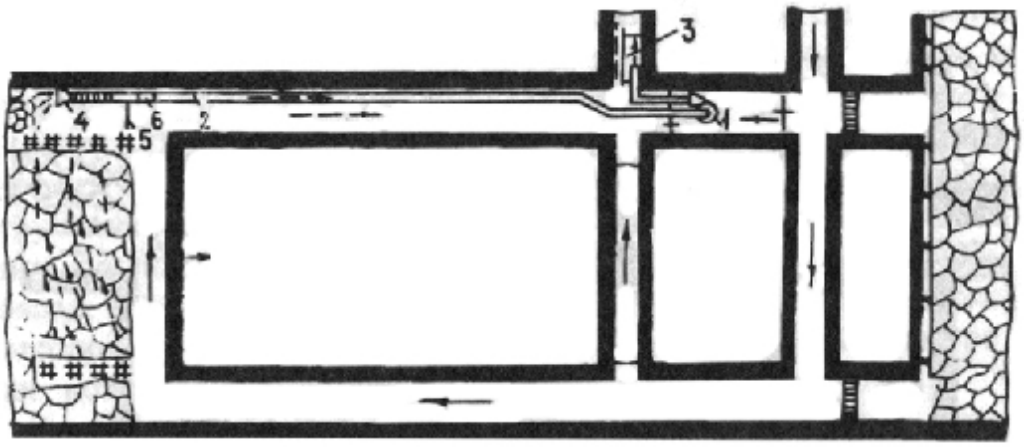


Рис. 2.15. Схема изолированного отвода метана из погашаемого тупика вентиляционной выработки (столбовая система разработки): 1 – вентилятор; 2 – трубопровод; 3 – смесительная камера; 4 – всасывающий патрубок; 5 – перемычка; 6 – регулирующее окно

2.10. Борьба со слоевыми скоплениями метана

При суфлярных выделениях метана, а иногда и при обыкновенных, возникает образование слоя метана у кровли толщиной до 70 см, а длиной в отдельных случаях до 250 м. Слоевые скопления обычно происходят на расстоянии 20…120 м от лавы, а также в тупиковых горных выработках на расстоянии 20 м от забоя. Наблюдались случаи, когда слой метана двигался по наклонной горной выработке снизу вверх навстречу движению вентиляционной струи. Опасность наличия слоевого скопления метана заключается в том, что в нём концентрация метана может достигнуть взрывоопасных значений. Опасность усугубляется ещё и тем, что при наличии слоя средняя концентрация метана в горной выработке находится в пределах допустимых значений, т.е. слоевое скопление не всегда вовремя обнаруживается.

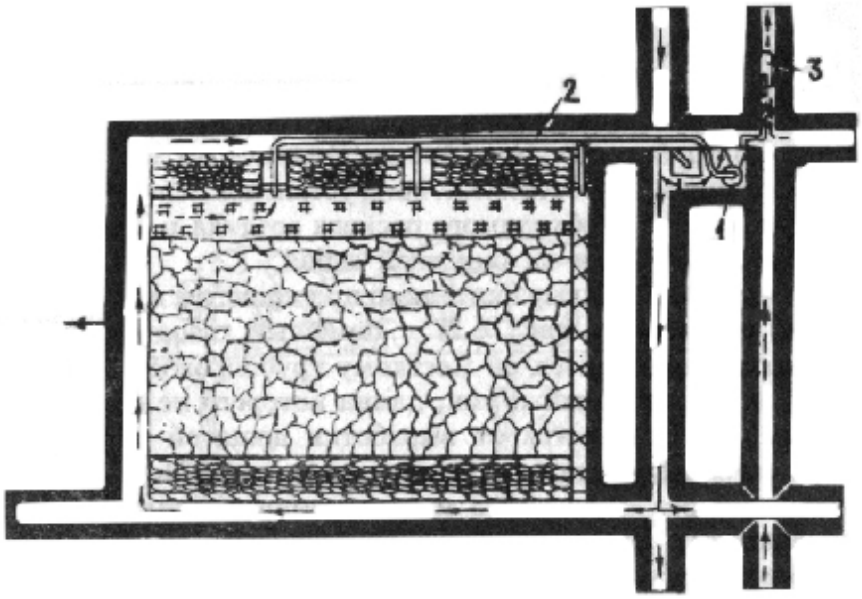


Рис. 2.16. Схема изолированного отвода метана при сплошной системе разработки: 1 – вентилятор; 2 – трубопровод; 3 – смесительная камера

В результате суфлярного выделения газа у кровли выработки могут образовываться слоевые скопления метана с концентрацией 2% и более, при толщине слоя более 5 см и длиной свыше 2,0 м. Из опыта ведения горных работ в зонах суфлярных выделений метана известно, что более 10% от общего числа взрывов газа на шахтах произошло из-за слоевых скоплений метана, которые являлись проводниками пламени к загазированным участкам.

В результате проведенных исследований установлено, что слоевые скопления чаще всего образуются в выработках, в которых имеет место выделения газа из кровли выработки. Одной из главных причин образования слоевого скопления метана у кровли выработок является меньшая плотность его по сравнению с воздухом.

Горение метана в слое может перейти во взрыв вследствие высокой скорости движения пламени. Шероховатость поверхности выработок и движение воздуха увеличивают вероятность возникновения взрыва.

Высокая скорость движения пламени по слоевому скоплению метана приводит к переводу во взвешенное состояние и взрыву пыли, отложившейся на поверхности выработок.

Ликвидация слоевых скоплений метана может быть достигнута путем увеличения подачи воздуха, что приводит к росту средней по сечению выработки скорости его движения.

Кроме этого, борьба со слоевыми скоплениями метана осуществляется различными устройствами, способствующими перемешиванию и повышению турбулизации воздушного потока.

Для ликвидации слоевых скоплений могут применяться перемычки с окном у кровли выработки в тех случаях, когда невозможно обеспечить необходимую среднюю скорость подачи воздуха в выработку в местах скопления метана. Перемычки применяют при концентрированном источнике газовыделения

с дебитом не более 0,5 м^3/мин и служат для повышения скорости потока в месте образования слоя метана.

Парус следует устанавливать перед источником выделения метана, на расстоянии не более 3 м от него с наклоном в сторону движения вентиляционной струи (рис. 2.17).

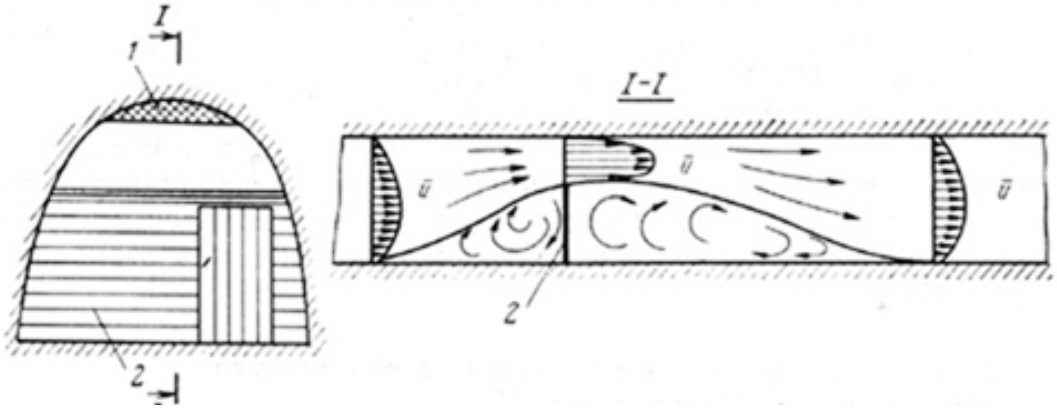
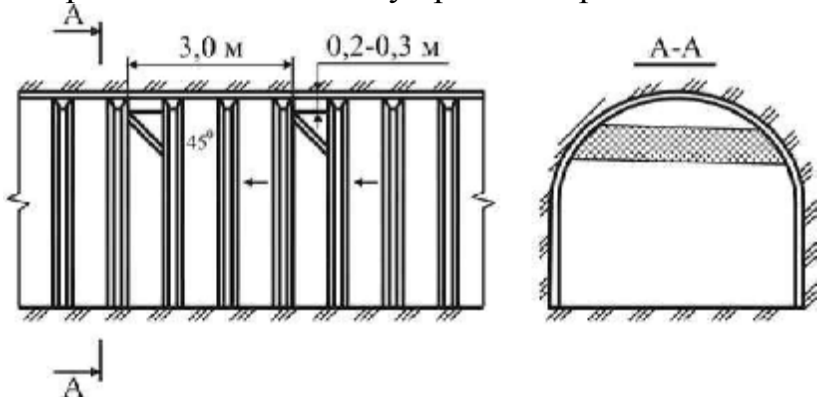


Рис. 2.17. Схема устройства перемычки для ликвидации слоевого скопления метана: 1 – слоевое скопление; 2 – перемычка

Если скорость движения воздуха в центре выработки не меньше расчетной, необходимой для размывания слоевого скопления метана, и дебит источника, образующего скопление, не превышает 1 м^3/мин – для ликвидации скопления метана можно применять наклонные щитки шириной 1,0 м. Щитки устанавливают на участке газовыделения на расстоянии 0,2…0,3 м от кровли или стенки выработки под углом 45º. Расстояние между щитками должно составлять 3,0 м.

Схема установки щитков и формирования потока воздуха на месте их установки представлена на рис. 2.18.

а) установка направляющих щитков у кровли выработки



б) схема формирования воздушного потока

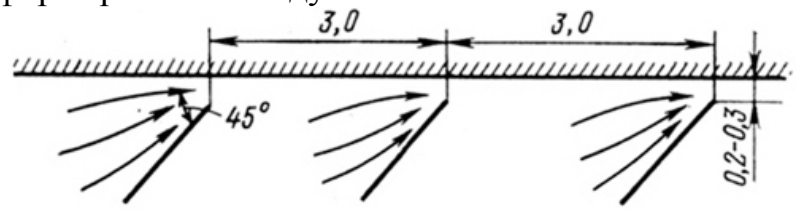


Рис. 2.18. Схема применения направляющих щитков у кровли выработки для ликвидации слоевого скопления метана

При рассредоточенных источниках газовыделения из кровли выработки с дебитом 0,5 м^3/мин и более для ликвидации слоевых скоплений метана устанавливают взвихривающие трубопроводы. Взвихривающий трубопровод изготавливают из стальной трубы диаметром 10…15 см, закрытой с одной стороны. На трубе в три ряда в шахматном порядке с шагом равным 0,5 м размещают патрубки диаметром 1,0 см и длиной 8…10 см (рис. 2.19). Длина трубопровода принимается равной длине участка, на котором наблюдается газовыделение. Взвихривающий трубопровод подвешивается на расстоянии 0,2…0,3 м от кровли выработки и к нему подводится сжатый воздух.

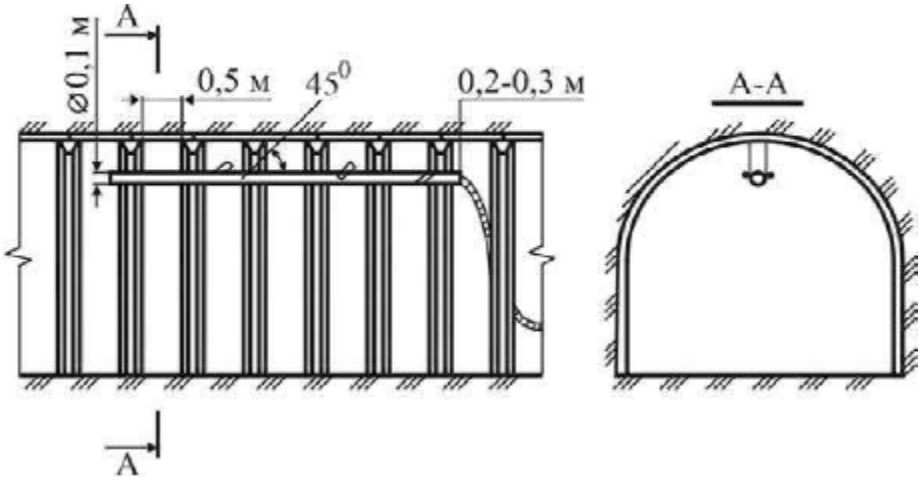


Рис. 2.19. Установка трубопровода в выработке

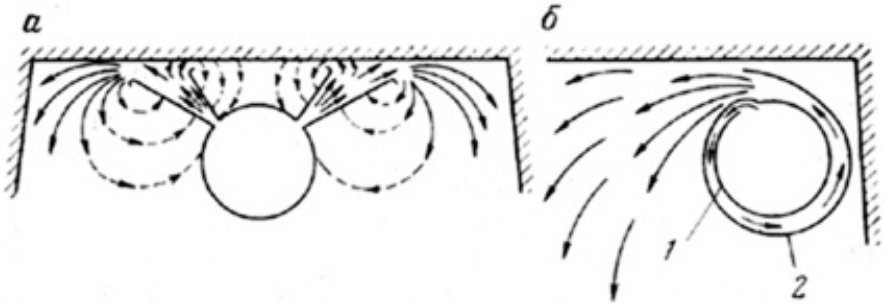


Рис. 2.20. Схема образования вихрей: *а* – свободными струями, выходящими из патрубков, вмонтированных в трубопровод; *б* – потоком воздуха, создаваемым спиральным кожухом; 1 – трубопровод; 2 – спиральный кожух.

Труба со сжатым воздухом диаметром 100…150 мм имеет в верхней части 2-3 ряда отверстий с патрубками, расстояние между отверстиями 0,5 м, d = 10…40 мм, подвешивается у кровли на 0,2…0,3 м.

2.11. Борьба с суфлярами

Прогнозирование зон, опасных по суфлярным выделения метана

Прогнозирование осуществляется с целью оконтуривания участков, опасных по суфлярным выделениям газа. Для накопления исходного материала с целью прогнозирования расположения зон, опасных по суфлярным выделени-

ям, необходимо иметь детальные сведения о происшедших ранее суфлярах, а также планы горных работ, на которых нанесены места происшедших суфляров и геологические нарушения, выявленные геологоразведочными скважинами или горными работами с указанием типа нарушения (закрытое или открытое).

При разработке сближенных пластов на планы горных работ должны быть нанесены проекции угольных целиков, оставленных на смежных пластах, а также взаимное расположение горных работ в свите разрабатываемых пластов.

В связи с тем, что суфляры геологического происхождения имеют зональное проявление, связанное с характером и ориентировкой геологических нарушений, последние должны проектироваться по падению или простиранию пласта на участки шахтного поля, намеченные к отработке. Размеры опасных по суфлярным выделениям зон при дизъюнктивных нарушениях составляет около 20 м в каждую сторону от плоскости сместителя нарушения.

В случае пликативных нарушений или пликативных, осложненных дизъюнктивными, ширина опасных по суфлярам зон равна ширине пликативного нарушения.

На смежных пластах часть угольного массива под и над целиками может быть опасной по суфлярным выделениям газа.

Текущий прогноз суфлярных выделений газа

При приближении выработки к зонам, опасным по суфлярным выделениям газа, и проведении выработок в этих зонах должно производиться бурение разведочных скважин с целью предотвращения внезапного прорыва газа в выработку, уточнения размеров и расположения опасных зон. Разведочные скважины должны буриться, начиная с 20 м от опасной по суфлярам зоны. При приближении выработки, проводимой по простиранию, к целику разведочные скважины должны буриться с расстояния от целика, равного мощности пород между пластами, а при проведении выработки по падению или восстанию пласта с расстояния, равного 0,8 расстояния междупластья. При проведении выработок вкрест простирания пластов разведочные скважины необходимо бурить с расстояния 10 м от пласта. Разведочные скважины бурятся диаметром 70…120 мм по направлению движения выработки на глубину 15…20 м при постоянном опережении ими забоя выработки не менее чем на 10 м.

Предотвращение суфлярных выделений газа

При дебите суфляров 1,5 $м^3$/мин и более необходимо применять меры по борьбе сними. Для борьбы с суфлярами осуществляется предварительная дегазация массива (путем применения передового бурения, опережающей отработки защитных пластов, соответствующего способа управления кровлей), увеличивается количество воздуха, подаваемое в опасные по суфлярным выделениям выработки.

Суфляры геологического происхождения могут быть предотвращены предварительной отработкой выше или ниже лежащих угольных пластов.

При надработке или подработке очистные работы на защитных пластах

должны опережать забои защищаемого пласта на расстояние не менее мощности пород междупластья, а на пластах крутого залегания – на расстояние не менее удвоенной мощности пород междупластья.

Для предотвращения суфлярных выделений газа применяют дегазацию угольных пластов и пород. Скважины для дегазации бурят таким образом, чтобы они пересекали наибольшее число трещин в породном и угольном массиве и выходили за контур выработки. Скважины бурят длиной 25…50 м и диаметром 50…150 мм. Дегазационные скважины бурят через задвижку и сальниковое уплотнение, чтобы не допустить поступление метана в выработку из скважины в процессе ее бурения. Газ, выделяющийся в скважину, отводится в исходящую струю воздуха или подключается к газопроводу, находящемуся под вакуумом. Выпуск газа в выработку должен осуществляться через диффузор-смеситель.

При подходе квершлага к газоносному пласту крутого залегания, опасного по суфлярным выделениям, для их предотвращения в выработке на расстояние от забоя, равном 3…5 м, бурят 5-6 дегазационных скважин с таким расчетом, чтобы они пересекали пласт.

При приближении выработки к пластам пологого и наклонного залегания в боках выработки проводятся камеры на расстоянии 15…20 м друг от друга, из которых бурятся скважины под углом 45º к оси выработки.

В особо сложных геологических условиях из забоя выработки по направлению к нарушению бурят серию скважин диаметром 80…100 мм и длиной 1,5…20 м под углом 3-6º к оси выработки, в которых герметизируют обсадные трубы. Через обсадные трубы бурят скважины диаметром 50…80 мм до вскрытия ими нарушения и в каждую скважину нагнетают цементный раствор. Затем бурят и цементируют таким же образом вторую серию скважин, которая перебуривает массив горных пород на расстояние 10…13 м за нарушением. Из камер, пройденных в боках выработки, бурят по 2-3 дегазационные скважины веерообразно в вертикальной плоскости под углом 5-15º к оси выработки длиной, превышающей длину второй серии цементационных скважин (30…40 м) и подсоединяют их к трубопроводу, находящемуся под вакуумом.

При проведении выработок по угольным пластам в зонах, опасных по суфлярным выделениям газа, из камер, пройденных в боках выработки, бурят по одной дегазационной скважине по углю и по одной-две скважины по газоносным породам почвы или кровли пласта, из которых возможно поступление газа в выработку.

При приближении выработки к целику дегазационные скважины могут быть пробурены как из проводимой выработки, так и из ближе расположенных выработок. Скважины бурятся такой длины, чтобы ими перекрывался весь участок пласта над и под целиком или возможно большая его длина.

При эксплуатационных суфлярах, источниками которых являются трещиноватые газоносные породы или угольные пласты и прослойки, залегающие в кровле на расстоянии не более 10 м и в почве не более 5,0 м, для предотвращения суфлярного выделения газа в выработку в ее почве или кровле бурят дегазационные скважины в неразгруженную зону по нормали к напластованию пласта и подключают эти скважины к дегазационному трубопроводу. Расстоя-

ние между скважинами не должно превышать 50 м.

Практически при ведении горных работ в зонах суфлярного выделения газа прогнозирование суфляров не осуществляется. По этой причине вскрытие суфляров, как правило, происходит внезапно.

При внезапных вскрытиях суфляров с большим дебитом газа может происходить опрокидывание воздушной струи и загазирование выработок, что приводит к тяжелым последствиям.

Для ликвидации последствий суфлярного выделения газа при вскрытии суфляров с небольшим дебитом безопасная концентрация газа в выработке может обеспечиваться путем усиления её проветривания. С этой целью в выработке устанавливается дополнительный вентилятор и прокладывается по выработке второй вентиляционный став.

В тех случаях, когда при суфлярном выделении с помощью проветривания не удается снизить концентрацию метана в выработке до норм, предусмотренных ПБ, применяется метод улавливания метана с последующим его отводом в исходящую струю или на поверхность при помощи колпаков или других устройств, перекрывающих суфлярные трещины. Обеспечение безопасных условий труда в выработках при вскрытии суфляров с высоким дебитом газа осуществляется путем отвода газа по специально проложенному ставу в исходящую струю воздуха. Для этого под трещину или полость, из которой выделяется газ, устанавливается металлическая воронка, которую необходимо забетонировать для герметизации трещины. К воронке подсоединяют металлический став, по которому газ отводиться в исходящую струю воздуха (рис. 2.21).

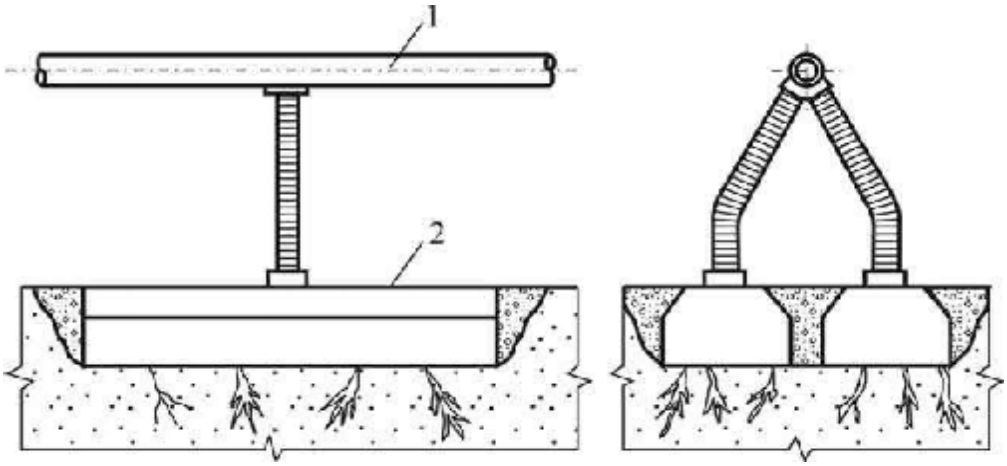


Рис. 2.21. Схема отвода газов при помощи каптажных воронок: 1 – дегазационный трубопровод; 2 – каптажные колпаки

Каптажные колпаки применяются при выделении метана из почвы, кровли или боков выработки. Изготовляются они из металлических вентиляционных труб, решетаков или листового железа толщиной 2…3 мм. Для отвода метана к ним привариваются патрубки, на которые надеваются резиновые шланги. Размеры колпака определяются размерами суфлярной трещины или площадью, с которой происходит метановыделение. Если метан выделяется на большой площади, может быть установлено несколько колпаков.

При установке каптажных колпаков на всей площади выделения метана производится выемка слоя породы или угля на глубину 30…40 см. Для создания герметичности вокруг колпаков и над ними устраивается бетонная или глиняная подушка.

Метан из-под каптажного колпака может выходить под собственным давлением или отсасываться под разрежением до 7 кПа. При необходимости колпаки могут быть подключены к газопроводу через водоотделитель.

При выделении метана на большой площади из кровли и боков выработки производится изоляция части выработки, в которую вводится трубопровод. Отвод метана производится в исходящую струю или в дегазационный газопровод.

В случае, когда невозможен непосредственный отвод метана из трещин с помощью колпаков, для улавливания метана бурятся скважины диаметром 45…105 мм.

При возникновении весьма интенсивных суфлярных выделений, когда нет возможности применить указанные выше способы их ликвидации, в выработке с суфляром необходимо устанавливать перемычку, из-за которой метан отводится в исходящую струю или в дегазационный газопровод. Для спуска воды, отвода метана и отбора проб воздуха в перемычке заделываются три отрезка труб диаметром от 35 до 100 мм. Труба, по которой отводится метан, оборудуется диафрагмой. Нижняя водоспускная труба для предупреждения возможного проникновения метана из-за перемычки имеет U-образную форму и заливается водой. Отверстие в трубе для отбора проб воздуха закрывается заглушкой.

2.12. Меры борьбы с внезапными выбросами

2.12.1. Прогнозирование выбросоопасности угольных пластов

В комплекс противовыбросных мероприятий входит, прежде всего, прогноз выбросоопасности.

Различают региональный и текущий прогнозы.

Региональный прогноз осуществляется в пределах разрабатываемых шахтных полей для установки критических глубин, с которых происходят выбросы.

Текущий прогноз основан на измерении сейсмоакустической активности пласта, а также измерении начальной скорости газовыделения из шпуров.

Сейсмоакустический метод основан на регистрации звукоулавливающей аппаратурой естественных сейсмоакустических импульсов в единицу времени.

Признаком входа очистного забоя в опасную зону считается рост импульсов на 5…10 %, по сравнению с предыдущим значением.

Текущий прогноз производится на угрожаемых и выбросоопасных пластах ниже критической глубины, установленной локальным способом.

В результате исследования физико-механических и газодинамических свойств и петрографического состава угольных пластов и пород установлены

некоторые отличительные признаки выбросоопасных и невыбросоопасных угольных пластов и выбросоопасных и невыбросоопасных пород, а также выбросоопасных и невыбросоопасных зон на выбросоопасных угольных пластах и породах.

Как выбросоопасные угольные пласты, так и выбросоопасные породы, существенно отличаются от невыбросоопасных по деформационным характеристикам. Существует связь между выбросоопасностью угольных пластов и степенью метаморфизма угля. Выбросоопасные угольные пласты и породы отличаются от невыбросоопасных по петрографическому составу. На выбросоопасные свойства как угля, так и пород, существенное влияние оказывает влага, содержащаяся в поровом пространстве в физически связанном состоянии. Выбросоопасные и невыбросоопасные зоны как в угольных пластах, так и в породах, существенно различаются по прочностным и газодинамическим свойствам.

Исходя из общности природы выбросоопасности угольных пластов и пород, а также наличия некоторых общих прогностических признаков, принципы прогнозирования выбросоопасности угля и породы должны быть едиными. Однако, вследствие количественного различия физико-механических свойств, газодинамических характеристик и качественного различия петрографического состава угля и пород их аналогичные прогностические признаки выбросоопасности имеют существенное качественное и количественное различие, а также различную информативность.

Следовательно, для обеспечения высокой надежности способов прогноза, они должны базироваться на тех прогностических признаках выбросоопасности, которые наиболее информативны для угольных пластов и пород.

В связи с локальностью выбросоопасносных зон как в угольных пластах, так и породах, прогнозирование выбросоопасности должно производиться в два этапа:

– на первом этапе должна определяться потенциальная выбросоопасность угольного пласта и пород;

– на втором этапе должно осуществляться прогнозирование выбросоопасных зон на потенциально выбросоопасных угольных пластах и породах.

Обобщением результатов исследований горно-геологических условий проявления выбросов угля и газа, физико-механических свойств угля, напряженно-деформированного и газодинамического состояния угольных пластов установлены следующие положения, на которых должно базироваться прогнозирование выбросоопасности угольных пластов:

1) выбросоопасные (в неопасных зонах) и невыбросоопасные угольные пласты существенно различаются по деформационным свойствам;

2) угольные пласты, расположенные выше минимальной глубины выбросов, так же являются невыбросоопасными;

3) угольные пласты, расположенные ниже минимальной глубины выбросов, могут быть выбросоопасными и невыбросоопасными;

4) ниже минимальной глубины выбросов горное давление и газоносность имеют постоянно выбросоопасные значения в угольных пластах за пределами влияния горных выработок.

Таким образом, прогноз выбросоопасности угольных пластов должен базироваться на всем комплексе показателей, определяющих выбросоопасность, а именно: степени метоморфизма, горном давлении, газоносности и физико-механических свойствах. Учитывая, что изменчивость указанных показателей невыбросоопасносных зон невелика, при этом способе прогноза вполне допустимо дискретное определение факторов, характеризующих выбросоопасность.

Определение выбросоопасности угольных пластов должно осуществляться в следующей последовательности.

В первую очередь определяется степень метаморфизма угля. Угольные пласты с выходом летучих веществ более 36% относятся к невыбросоопасным. Угольные пласты, имеющие значения логарифма удельного электросопротивления угля менее 3,3 относятся также к невыбросоопасным.

Затем устанавливают глубину, на которой будут вестись горные работы. Участки угольных пластов, расположенные выше минимальной глубины выбросов, являются невыбросоопасными.

Применяемые в настоящее время способы текущего прогноза выбросоопасных зон основаны, как правило, на определении одного показателя. Наиболее распространенным способом прогноза выбросоопасных зон на угольных пластах в Донецком бассейне является способ, основанный на измерении начальной скорости газовыделения из угольного пласта в шпур.

Прогноз выбросоопасных зон по начальной скорости газовыделения базируется на непрерывном (через интервалы, равные 2…3 мм), по мере подвигания забоев выработок, измерении начальной скорости газовыделения в шпур.

Прогноз выбросоопасных зон по начальной скорости газовыделения состоит из двух этапов: разведочных наблюдений и прогнозирования выбросоопасных зон. На этапе разведочных наблюдений определяется изменчивость мощности и крепости угольного пласта и начальной скорости газовыделения. На основном этапе определяется только начальная скорость газовыделения.

Для выполнения измерений начальной скорости газовыделения из забоя по направлению проведения выработок в угольном пласте бурится поинтервально шпур диаметром 42…43 мм на глубину 3,5 м, который на каждом интервале бурения герметизируют при помощи газозатворов ПГШ-1 или ЗГ-1 с таким расчетом, чтобы между резиновым уплотнителем и забоем шпура оставалась измерительная камера длиной 0,5 м.

Измерение начальной скорости газовыделения должно производиться через каждый 1,0м по длине контрольного шпура. Для оценки выбросоопасности измеренная начальная скорость газовыделения ($\partial_н$) сопоставляется с ее критическим значением.

Критические значения начальной скорости газовыделения устанавливаются в зависимости от марки угля и составляют:

– при V^{daf} менее 15% – $\partial_н$ = 5 л/мин.;
– при V^{daf} от 15 до 20% – $\partial_н$ = 4,5 л/мин.;
– при V^{daf} от 20 до 30% – $\partial_н$ = 4 л/мин.;
– при V^{daf} свыше 30% – $\partial_н$ = 4,5 л/мин.

Здесь V^{daf} – выход летучих веществ с угольного пласта.

Зона относится к опасной, если измеренная начальная скорость газовыделения больше ее критического значения.

Прогноз выбросоопасных зон в угольных пластах можно осуществлять по скорости газовыделения из штыба.

Определение показателя скорости газовыделения из штыба (АР) в шахтных условиях предлагается осуществлять прибором Д-1 (рис. 2.22).

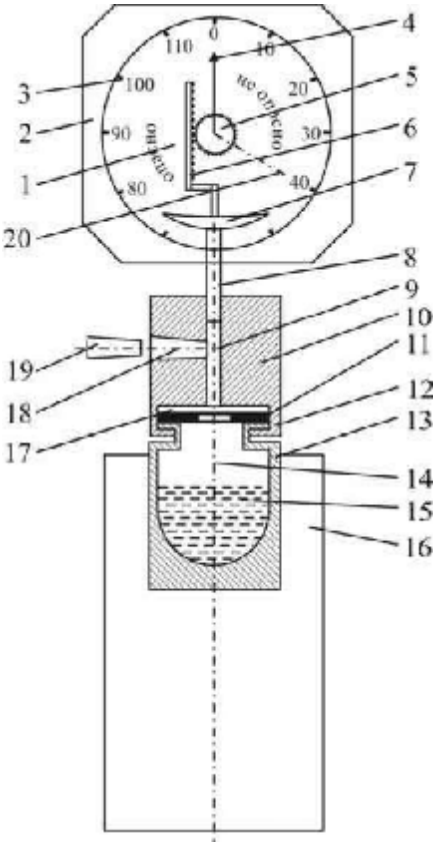


Рис. 2.22. Схема прибора Д-1: 1 – микроманометр; 2 – корпус; 3 – измерительная шкала; 4 – стрелка; 5 – шестеренка; 6 – подвижная рейка; 7 – диафрагма; 8 – штуцер; 9 – канал; 10 – верхний цилиндр; 11 – уплотнительная прокладка; 12 – штыковой затвор; 13 – нижний цилиндр; 14 –емкость для размещения штыба; 15 – штыб; 16 – ручка; 17 – сеточка; 18 – соединительный канал; 19 – пробка; 20 – красная черта, разграничивающая выбросоопасные и невыбросоопасные значения АР

Прибор Д-1 представляет собой микроманометр, соединенный с емкостью для угольного штыба. Прибор состоит из стрелки-указателя (4), зубчатой шестеренки (5), зубчатой рейки (6), корпуса (10), мембраны (7), металлической сетки (17), емкости для угольного штыба (14), в которую помещается угольный штыб (15).

Для определения АР из шпура, пробуренного по угольному пласту, отбирают навеску штыба и помещают ее в емкость (14). Навеска штыба должна составлять около 10 г. Затем соединяют емкость, заполненную штыбом с микроманометром. После этого закрывают отверстие (18) и в течение 30 с наблюдают по манометру за ростом давления в емкости (14). Показания манометра сверяют с величиной критического давления для углей данной степени метаморфизма. Если показания манометра через 30 с превысят критическое значение, то зона в угольном пласте считается выбросоопасной.

Для прогноза выбросоопасности в подготовительных выработках штыб отбирают не менее чем в двух шпурах, удаленных друг от друга на максимальное расстояние. Длина шпуров должна быть на 0,5 м больше величины выемки угля за один цикл. В очистных выработках шпуры бурятся в направлении подвигания лавы на расстоянии 5 м друг от друга. Проба штыба для определения скорости газоотдачи отбирается из каждого шпура.

Для углей с выходом летучих веществ $V^{daf} > 25\%$ критическое значение АР составляет 14 усл. ед. Для углей с выходом летучих веществ $V^{daf} < 25$, АР составляет 18 усл. ед.

Выбросоопасные зоны в угольных пластах представлены углем с повы-

шенной степенью нарушения структуры. В связи с этим уголь в выбросоопасных зонах обладает высокой скоростью десорбции газа. Десорбция газа происходит с поглощением тепла. По этой причине температура свежеобнаженного забоя угольного пласта в выбросоопасной зоне ниже, чем температура в соседних невыбросоопасных зонах.

Температура на забое угольного пласта может определяться безконтактным способом, путем измерения инфракрасного излучения забоя угольного пласта.

2.12.2. Способ прогноза выбросоопасности перед вскрытием угольных пластов

Для определения выбросоопасности угольного пласта в месте его вскрытия через породную пробку бурят три шпура такой длины, чтобы угольный пласт перебуривался на всю мощность. Из этих шпуров отбираются пробы угля для определения крепости угля f и йодного показателя АУ. Затем в этих шпурах измеряют начальную скорость газовыделения $д_н$. Угольный пласт в месте вскрытия считается неопасным, если все три показателя имеют неопасные значения, а именно $д_н < 2$ л/мин., $f > 0{,}6$ у.е., АУ < 34 мг/г.

Горное давление и газоносность являются основными энергетическими параметрами выбросов. Их значения на минимальной глубине выбросов могут быть приняты в качестве критических для оценки выбросоопасности пород. В этой связи в породах, залегающих ниже минимальной глубины выбросов, определение горного давления и газоносности нецелесообразно вследствие того, что на глубинах, больших минимальной глубины выбросов, горное давление и газоносность будут постоянно иметь выбросоопасные значения. Для оценки выбросоопасности песчаников по факторам горного давления и газоносности достаточно располагать данными о том выше или ниже минимальной глубины выбросов располагаются песчаники.

Таким образом, основными наиболее информативными показателями для оценки выбросоопасности песчаников являются: степень метаморфизма угля в зоне залегания песчаника, минимальная глубина выбросов, пористость, влажность, деформационные свойства, степень заполнения пор газом.

2.12.3. Предотвращение выбросов угля, пород и газа

Из результатов исследования природы и механизма выбросов следует, что выброс происходит вследствие трансформирования в работу разрушения потенциальной энергии упругого деформирования угольного пласта и пород, высвобождающейся при нарушении их равновесного состояния и переходе из объемного в одно- или двухосное напряженное состояние во время отторжения угля или пород от массива, и энергии газа, содержащегося в угольном пласте или породе и выделяющегося во время их разрушения при выбросе, которая

выполняет работу перемещения разрушенного угля или породы по выработке.

В работу разрушения трансформируется только та часть высвобождающейся энергии упругого деформирования массива горных пород, которая реализуется в упругих деформациях. Величина этой зависит от скорости изменения напряженного состояния призабойной части массива горных пород при их отторжении.

Следовательно, для предотвращения выбросов необходимо в выбросоопасных зонах изменить соотношение между величиной энергии, высвобождающейся в призабойной части угольных пластов и пород при их отторжении, и величиной работы их разрушения, а также величиной энергии газа, содержащегося в угольных пластах и породах, и работой их перемещения таким образом, чтобы энергия упругого деформирования угольного пласта и пород и энергия газа, трансформирующаяся в работу разрушения и перемещения разрушенных выбросом угля и породы, были меньше соответственно величин работы разрушения и работы перемещения разрушенных выбросом угля и породы.

Обеспечить такое соотношение можно:

– за счет снижения величины высвобождающейся энергии упругого деформирования в призабойной части массива горных пород при их отторжении и энергии газа в угольных пластах и породах путем разгрузки (снижения величины горного давления) и дегазации;

– повышением пластических свойств угля и выбросоопасных пород, что способствует снижению склонности угольных пластов и пород к накоплению потенциальной энергии упругого деформирования и склонности к хрупкому разрушению;

– снижением скорости изменения напряженного состояния (перехода из объемного в одно- или двухосное напряженное состояние) призабойной части угольных пластов и пород при их отторжении, что способствует рассеиванию в массиве горных пород потенциальной энергии упругого деформирования;

– варьированием горнотехническими факторами, влияющими на величину разгруженной и дегазированной зоны в призабойной части угольных пластов и пород.

Практическая реализация изложенных положений может быть достигнута:

– локальной или региональной разгрузкой и дегазацией угольных пластов и пород путем образования разгрузочных щелей и полостей, а также предварительной обработкой защитных угольных пластов;

– переводом выбросоопасных угольных пластов из упругого деформированного состояния в пластическое (при возможности нагнетания в них воды с поверхностно активными веществами);

– снижением скорости изменения напряженного состояния призабойной части угольных пластов и пород (перехода из объемного в одно- или двухосное напряженное состояние) путем уменьшения скорости их разрушения исполнительными органами добычных и проходческих машин;

– варьированием горнотехнических факторов, влияющих на величину раз-

груженной и дегазированной зоны в призабойной части угольных пластов и пород путем гидрообработки призабойной части угольных пластов, управления породами кровли в очистных угольных выработках для исключения их зависания, приданием забою выработки прямолинейной формы, регулирования скорости подвигания забоев в соответствии со скоростью естественного формирования разгруженной и дегазированной зоны в призабойной части угольных пластов и пород.

В связи с общностью природы и механизма выбросов угля и пород способы предотвращения выбросов в угольных пластах и породах также основываются на общих принципах.

В отдельных случаях, в связи с существенным различием физико-механических свойств угля и выбросоопасных пород, способы, эффективные для предотвращения выбросов угля, могут быть недостаточно эффективными для предотвращения выбросов породы.

Предотвращение выбросов угля и пород путем предварительной отработки защитных угольных пластов

Наиболее эффективным способом предотвращения выбросов угля, пород и газа является способ, основанный на разгрузке и дегазации выбросоопасных угольных пластов и пород путем предварительной отработки защитных угольных пластов. Эффективность этого способа зависит от мощности защитного пласта, расстояния от защищаемых угольного пласта или породы до защитного пласта, состава пород между пластами, способа управления кровлей на защитном пласте.

Основными параметрами способа являются:

1) величина опережения защитным пластом защищаемого угольного пласта или забоев выработок, проводимых под защитой;

2) размеры защищенной зоны;

3) расстояние от защитного пласта до защищаемого или до выработок, проводимых под защитой.

Защитное действие опережающей разработки защитных пластов заключается в снижении горного и газового давлений, увеличении газопроницаемости путем разгрузки и дегазации надрабатываемых и подрабатываемых пластов угля и пород (рис. 2.23).

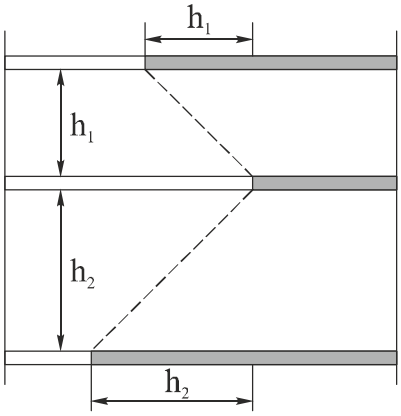


Рис. 2.23. Опережающая разработка защитных пластов

Если все пласты в свите являются склонными к выбросам, то в качестве защитного пласта применяется один из них, который отрабатывается как одиночный пласт.

Минимальное опережение, при подработке и надработке, равно мощности пород междупластья, но не менее 20м. Максимальное опережение не ограничивается.

Предотвращение выбросов угля и пород образованием разгрузочных щелей и полостей

Предотвращение выбросов угля и породы путем образования разгрузочных полостей и щелей основано на разгрузке и дегазации призабойной части угольных пластов и пород. Разгрузочные щели и полости для предотвращения выбросов угля могут образовываться как непосредственно в угольном пласте, так и во вмещающих угольный пласт породах, а для предотвращения выбросов пород как непосредственно в выбросоопасных породах, так и в породах, расположенных вблизи выбросоопасных пород.

Образование разгрузочных щелей и полостей во вмещающих породах гарантирует предотвращение выбросов в процессе их образования.

При образовании разгрузочных щелей непосредственно в выбросоопасном угольном пласте предотвращение выбросов в процессе их образования обеспечивается регулированием скорости подвигания и положением исполнительного органа щелеобразуемой машины.

Процесс образования разгрузочных полостей и щелей хорошо вписывается в технологию ведения очистных и подготовительных работ.

В очистных выработках разгрузочная щель образуется непосредственно в угольном пласте по всей длине лавы, а в подготовительных выработках – по ширине выработки.

При проведении выработок по выбросоопасным угольным пластам смешанными забоями комбайнами избирательного действия разгрузочные полости могут образовываться путем предварительной выемки в забое выработки вмещающих пород.

При проведении выработок по выбросоопасным породам щель может образовываться по контуру выработки или располагаться горизонтально в сечении выработки. Щели могут образовываться механическим способом или с помощью невзрывчатых разрушающих веществ.

После образования разгрузочной щели в выработке, проводимой по выбросоопасным породам, производится бурение, заряжание и взрывание шпуров для разрушения породного массива. При этом длина шпуров должна быть на 0,3м меньше глубины щели.

Описанная технология отличается от технологии проведения выработок в обычных условиях только дополнительными работами, связанными с образованием разгрузочной щели. Дополнительные затраты на образование разгрузочной щели компенсируются предотвращением выбросов породы и газа, и, как следствие этого, отсутствием необходимости выполнения работ по ликвидации последствий выбросов; ликвидацией переборов породы при образовании щели

по контуру выработки; наличием второй обнаженной поверхности, значительно улучшающей технико-экономические показатели буровзрывных работ.

Предотвращение выбросов при проведении выработок по выбросоопасным породам комбайнами роторного типа

Предотвращение выбросов при проведении выработок по выбросоопасным породам комбайнами роторного типа достигается путем разрушения породы в выбросоопасной зоне исполнительным органом комбайна (только по контуру забоя выработки) и регулирования скорости разрушения массива горных пород.

Для обеспечения разрушения породы только по контуру забоя при проведении выработки по выбросоопасным породам исполнительный орган комбайна должен иметь полусферическую форму со стрелой прогиба полусферы, равной не более 0,2 его диаметра. Увеличение стрелы прогиба исполнительного органа комбайна приведет к тому, что порода будет разрушаться исполнительным органом по всему забою, что может при определенной скорости разрушения вызвать выброс.

Предотвращение выбросов бурением дренажных шпуров и скважин

В качестве локальных способов предотвращения выбросов могут применяться дренажные скважины и шпуры. Дренажные скважины и шпуры могут применяться для предотвращения выбросов в угольных пластах и калийных солях. При этом со стороны забоя выработки в направлении ее проведения для разгрузки и дегазации призабойной части угольного пласта бурятся скважины длиной 10…15 м и диаметром 150…250 мм, а в калийных солях – дренажные шпуры вкрест простирания пласта.

Предотвращение выбросов угля и пород путем гидрообработки выбросоопасного массива

Для предотвращения выбросов угля и калийных солей применяют способы, основанные на гидрообработке угольных и калийных пластов.

Для реализации этого способа со стороны забоя по углю бурят скважины длиной 4…8 м и диаметром 43 мм. Затем скважины герметизируются, и в них нагнетается вода под давлением 10…15 МПа. Под давлением нагнетаемой воды происходит разрушение (рыхление) угля или калийных солей в призабойной части пласта. При этом пласт теряет в зоне рыхления несущую способность, вследствие чего зона опорного давления перемещается вглубь массива за пределы зоны рыхления. Пласт в зоне рыхления разгружается и дегазируется.

Для обеспечения эффективности гидрорыхления фильтрационная камера в скважине должна располагаться на участке пласта между зоной влияния выработки и зоной максимума опорного давления. При расположении фильтрационной камеры за зоной максимума опорного давления гидрорыхление не произойдет и нагнетание воды в этом случае приведет лишь к повышению напряжений и давления газа в зоне нагнетания. Нагнетание воды в зоне влияния выработки нецелесообразно потому, что эта зона разгружена и дегазирована, и

при нагнетании, вода будет уходить по трещинам, не производя работы рыхления.

В тех случаях, когда пробурить скважины для гидрорыхления невозможно, применяют гидроотжим пласта. Для гидроотжима призабойной части угольного пласта бурят со стороны забоя в направлении подвигания выработки скважины диаметром 43 мм и длиной не более 4 м.

Скважины герметизируются гидрозатворами, и в них нагнетается под давлением вода. Темп нагнетания воды при гидроотжиме пласта должен быть значительно (на порядок) выше, чем при гидрорыхлении. При нагнетании воды в угольный пласт под давлением с высоким темпом происходит отрыв призабойной части пласта, разгрузка и дегазация его. Вследствие высокой скорости изменения напряженного состояния в призабойной части угольного пласта при выполнении гидроотжима могут происходить выбросы.

Вопросы для самоконтроля

1. Физико-химические свойства метана.
2. Происхождение метана.
3. Виды связи метана с горными породами.
4. Метаноносность и метаноемкость угольных пластов и пород. Определяющие факторы.
5. Виды выделения метана в шахтах.
6. Газовый баланс шахты.
7. Основные источники выделения метана в шахтах.
8. Категории шахт по метану.
9. Допустимое содержание метана в горных выработках.
10. Меры борьбы с метаном средствами вентиляции.
11. Дегазация при проведении подготовительных выработок.
12. Дегазация неразгруженных угольных пластов.
13. Дегазация сближенных угольных пластов и вмещающих пород при их подработке и надработке.
14. Дегазация выработанного пространства.
15. Борьба со слоевыми скоплениями метана.
16. Борьба с суфлярнымими выделениями метана.
17. Меры борьбы с внезапными выбросами угля, породы и газа.

РАЗДЕЛ 3. ЗАПЫЛЁННОСТЬ АТМОСФЕРЫ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в третьем разделе пособия:

– определять источники образования пыли на горных предприятиях;

– дифференцировать рудничную пыль в зависимости от размера частиц;

– оценивать влияние пыли на организм человека и возможность возникновения заболеваний;

– нормировать на рабочих местах содержание пыли в атмосфере;

– давать гигиеническую оценку условий труда по пылевому фактору;

– разрабатывать мероприятия по предотвращению вредного влияния пыли на организм человека;

– определять взрывчатость угольной пыли;

– прогнозировать последствия взрыва угольной пыли;

– разрабатывать мероприятия по снижению запыленности горных выработок;

– исключать появление источников воспламенения пыли;

– разрабатывать мероприятия по локализации взрывов пыли;

– прогнозировать распространение пылевого облака в атмосфере карьера;

– разрабатывать технические мероприятия по борьбе с карьерной пылью как профессиональной вредностью;

– организовывать медико-санитарные и социально-бытовые мероприятия по уменьшению негативного влияния пыли на организм человека.

3.1. Общие сведения о рудничной пыли и ее влияние на организм человека

В аэрологии горных предприятий пыль изучается в двух направлениях:

1) как *профессиональная вредность*;
2) как *причина взрывов*.

В зависимости от размера пылевых частичек пыль подразделяют на:

1) *макроскопическую* – с диаметром частичек более чем 10 мкм, видимую невооруженным глазом;
2) *микроскопическую* – с диаметром частичек от 0,1 до 10 мкм, видимую в микроскопе;
3) *субмикроскопическую* – с частичками, размером менее чем 0,1 мкм (наночастицы), видимую лишь в электронном микроскопе.

Влияние пыли на организм человека

Твердые пылинки с острыми краями могут вызвать травмы глаз, кожи, верхних дыхательных путей. Попадание пыли в глаза может привести к развитию конъюнктивита и изменения роговых оболочек глаз, а попадание на кожу – к воспалительным процессам (дерматитам, экземам).

Продолжительное вдыхание запыленного воздуха приводит к поражению верхних дыхательных путей (катар верхних и средних бронхов, бронхиальная астма), а также к заболеванию легких (фиброз, пневмокониоз и пневмония). Токсичная пыль (ртутная, свинцовая, мышьяковая, марганцевая и др.) вызывает отравляющее действие. При закупоривании сальных желез может возникнуть сыпь (гнойные образования). Едкая и раздражающая пыль (мышьяка, извести, кухонной соли) вызывает язвенные дерматиты. При оседании на оборудование, проникая между поверхности трения, пыль приводит к ускоренному износу машин, ухудшает состояние изоляции электрооборудования.

Основным заболеванием в случае вдыхания пыли считается пневмокониоз, основными видами которого являются:

силикоз – при вдыхании пыли с содержанием свободного диоксида кремния SiO_2 более 10%;

силикатоз (асбестоз, талькоз, цементоз и др.) – при вдыхании пыли с содержанием свободного диоксида кремния меньше 10% или не содержащей его;

металлокониоз (берилиоз, алюминоз, марганцекониоз и др.) – при вдыхании пыли указанных металлов, которые обладают токсико-аллергическим действием;

карбокониоз (антракоз, графітоз) – при вдыхании пыли, которая содержит уголь, графит, кокс и др.;

пневмокониоз от смешанных пылей (сидеросиликоз, силикатосиликоз, пневмокониоз электросварщиков и др.);

пневмокониоз от органической пыли (хлопка, льна, зерна и др.).

Наиболее распространенным и тяжелым заболеванием считается силикоз. Механизм заболевания силикозом состоит в том, что подвижные клетки в организме человека (фагоциты), поглощая пылевые частички, под влиянием H_2SiO_3 видоизменяются в легких и превращаются в волокна соединительной ткани (фиброз). Это приводит к нарушению нормальной работы легких, кровообращения, сердца и человек может погибнуть от декомпенсации сердца или пневмонии. На рудных уступах железорудных карьеров содержание свободного диоксида кремния в пыли составляет 20...30%, на некоторых карьерах цветной металлургии оно достигает 60%.

Доказано, что свежеобразованная пыль при одинаковом химическом и дисперсном составе более вредная, чем состарившаяся пыль. Так, пыль песчаных пустынь с концентрацией до 60% свободного диоксида кремния является инертной.

При заболевании на антракоз образование фиброзной ткани в легких протекает менее интенсивно. Разные люди имеют разную восприимчи-

вость к пылевым заболеваниям.

Наибольший размер пылинок, которые попадают в легкие человека, составляет 10 мкм. Большинство пылинок имеют размер 5 мкм и менее. В особенности опасными считают частички пыли, размером менее 2 мкм.

В Кривом Роге, при разработке месторождений открытым способом, содержимое фракций пыли, меньших 1,4 мкм, на расстоянии 40 м от блока, в котором проведены взрывные работы, составляет более 60%, а на расстоянии 600 м – 80%.

Нормирование содержания пыли в воздухе

В соответствии с ПБ запыленность воздуха рабочих мест на горных предприятий для ряда веществ не должна превышать следующих предельно-допустимых концентраций (мг/м^3) в зависимости от концентрации кристаллического диоксида кремния (SiO_2):

– при содержании в пыли SiO_2 более чем 70% (кварц, динас и др.) – 1 мг/м^3;

– при содержании в пыли SiO_2 от 10 до 70% (гранит, шамот, слюда-сырец, пыль углерода и т.п.) – 2 мг/м^3;

– при содержании в пыли SiO_2 от 2 до 10% (горючие сланцы, медно-сульфидные руды, угольнопородная и угольная пыль, глина и др.) – 4 мг/м^3;

– пыль естественного и искусственного асбеста, а также смешанной асбестопородной пыли при концентрации в ней асбеста более чем 10% – 2 мг/м^3;

– пыль талька, слюды и мусковита – 4 мг/м^3;

– пыль цемента, аппатита, оливина, форстерита, глины – 6 мг/м^3;

– пыль каменного угля при содержании в нем SiO_2 менее чем 2% – 10 мг/м^3.

Гигиеническая оценка условий труда по пылевому фактору

Критерием гигиеничной оценки условий труда по пылевому фактору является продолжительность работы в забоях или других местах $T_{кр}$, которая не приводит к заболеванию пневмокониозом. Эта продолжительность находится по формуле

$$T_{кр} = \frac{10^5 \cdot M_{кр}}{1{,}6 \cdot t \cdot c \cdot n \cdot K_a}, \text{ лет,}$$

где $M_{кр}$ – критическая масса пыли, которая находится в легких и не приводит к развитию фиброзного процесса, равна 20 г; c – концентрация пыли в зоне дыхания, мг/м^3; t – время работы в запыленной атмосфере в смену, мин; n – число смен, отработанных работником в течение года; K_a – коэффициент, зависящий от минутного объема легочной вентиляции, массовой доли тонкодисперсной пыли размером частиц менее 10 мкм и задержки частиц пыли этого размера в дыхательной системе, м^3/мин.; при легкой работе $K_a = 0{,}02$; при работе средней тяжести $K_a = 0{,}04$; при тяжелой работе $K_a = 0{,}06$.

По величине $T_{кр}$ рабочие места условно разделяют на 4 группы:

1 группа – слабозапыленные, при $T_{кр}$ = 30 лет;

2 группа – умеренно запыленные, при $T_{кр}$ = 20...30 лет;

3 группа – запыленные, при $T_{кр}$ = 10...20 лет;

4 группа – сильно запыленные, при $T_{кр}$ < 10 лет.

Организация работы не должна разрешать продолжительное пребывание людей на рабочих местах 3 и 4 групп пыльности.

Основные свойства пыли

Смачиваемость. Горные породы распределяются на *гидрофильные* и *гидрофобные*. К породам, которые хорошо смачиваются водой (гидрофильные), относятся кварц, сульфаты, силикаты, карбонаты и др. Плохо смачиваются водой (гидрофобные) сульфиды, графит, уголь и др.

Для пылеподавления при разработке гидрофобных пород необходимо использовать поверхностно активные вещества. Чем больше величина краевого угла смачивания, тем лучше смачивается порода.

Для повышения эффективности мероприятий борьбы с пылью, основанных на использовании воды, применяют поверхностно-активные вещества (ПАВ), такие, как ДБ, ОП, синтанол и др. В соответствии с данными МакНИИ примесь ДБ повышает эффективность подавления пыли на 10..50% вследствие того, что уменьшаются силы поверхностного натяжения воды и увеличивается смачивающая способность твердого тела жидкостью.

Электрозаряженность. Существенное значение на оседание пыли и взаимодействие частичек пыли имеет знак их электрического заряда и его величина. Частички пыли с одинаковыми зарядами отталкиваются, а с противоположными зарядами – притягиваются. От этого зависит степень их слипания, коагуляция и выпадение из воздуха под действием сил гравитации.

Неметаллические вещества и кислотные окислы имеют положительный заряд, частички металлов и щелочных окислов – отрицательный заряд. Электризация пылевых частичек происходит вследствие адсорбции ионов в газовой среде, а также трения частичек между собой или о твердую поверхность.

Заряженные пылевые частички отрицательно влияют на человека, если попадают в организм. Заряженность частичек пыли влияет на адгезию (прилипания к твердой поверхности) и аутогезию (слипание частичек между собой).

Пыль многих веществ, как горючих, так и инертных, взрывается. К горючим веществам, пыль которых взрывается, относятся мука, крахмал, сахар, дерево, уголь и др. Взрывается пыль таких негорючих веществ как алюминий, железо, цинк, сера, колчедан и др.

Причинами взрыва могут стать:

– большая поверхность контакта пыли с кислородом;

– поглощение кислорода пылью;

– выделение из пыли при ее нагревании некоторых горючих газов (угольная пыль, пыль серы, пыль колчеданных руд и др.).

Серная пыль, которая поднялась в воздух, более взрывоопасна, чем угольная. Температура ее воспламенения составляет 275...340ºС. Нижняя граница взрываемости составляет 5 г/м^3 для комковатой серы и 15 г/м^3 для кристаллической. Все рудники, полезные ископаемые которых вмещают большее, чем 10% свободной серы, относятся в соответствии с ПБ к категории опасных по взрыву серной пыли.

Опасные по взрыву пыли серные рудники делятся на две группы:

I группа – со средней вместимостью серы в руде от 12 до 18%;

II группа – со средней вместимостью серы в руде более 18%.

Сульфидная пыль взрывается при плотности пылевого облака 250...1000 г/м^3 и при дисперсности пыли 0,1 мм и менее. Взрыв максимальной силы наблюдается при концентрации 286 г/м^3. Температура воспламенения пыли составляет 435...450ºС.

Опасность взрыва серной и сульфидной пыли в подземных выработках обуславливается образованием серного газа и сероводорода, которые могут вызвать отравление работников в шахте. Взрывы пыли могут сопровождаться пожарами.

3.2. Угольная пыль. Способы предупреждения взрывов пыли

3.2.1. Взрывчатые свойства угольной пыли

В угольных шахтах пыль является одним из основных вредных производственных факторов. Вдыхание ее может привести к профзаболеваниям. Угольная пыль является также и опасным фактором, так как образует с воздухом взрывчатые смеси.

Взрывчатость как угольной, так и другой пыли объясняется:

– большой поверхностью соприкосновения тонкодисперсной пыли с кислородом (1 см^3 разрушенного до 1 мкм угля будет иметь суммарную поверхность 60000 см^2).

– выделением пылью, при нагревании, горючих газов.

Необходимые *условия для взрыва пыли* следующие:

– взрывчатая пыль должна быть во взвешенном состоянии (причиной этого могут быть взрыв CH_4, взрывные работы, обрушение кровли, прорывы трубопроводов сжатого воздуха, работа очистных и проходческих комбайнов без орошения);

– пылевое облако должно иметь определенную концентрацию (нижний концентрационный предел взрывчатости $\delta_в$ = 10…15 г/м^3 при выходе летучих веществ для сильновзрывчатой пыли $V^{daf} > 30\%$, а для слабовзрывчатой $\delta_в$=50…100 г/м^3);

– должен быть источник воспламенения с t = 700…800°С (источником воспламенения могут быть взрывы метана, БВР, короткие замыкания, воз-

горание разрушенных самоспасателей, саморазряды статического электричества, искрение при работе выемочных органов очистных и проходческих комбайнов, нагретые поверхности механического оборудования).

Взрывы пыли сопровождаются динамическим и термическим эффектами:

– *динамический* – образование ударной воздушной волны с давлением до 2 МПа;

– *термический* – температура взрыва достигает 2300…2500°С.

3.2.2. Факторы, влияющие на взрывчатость угольной пыли

Взрывчатость пыли зависит от выхода летучих веществ, ее дисперсности, концентрации, состава атмосферы, влажности и зольности.

а) Выход летучих веществ V^{daf}. Способность к воспламенению пыли возрастает с увеличением выхода летучих веществ.

К опасным по взрывам пыли относят пласты угля (горючих сланцев) с $V^{daf} \geq 15\%$, а также пласты угля (кроме антрацитов) с меньшим выходом летучих веществ, взрывчатость пыли которых установлена лабораторными испытаниями.

*б) Дисперсность пыли***.** Взрывчатость пыли возрастает с увеличением степени ее измельчения.

Наиболее взрывчатая пыль, состоящая из частиц размером от 10 до 100 мкм, однако во взрыве могут принимать участие частицы размером до 1 мм.

в) Концентрация пыли. Сила взрыва растет с увеличением концентрации пыли до 300…400 г/м^3. Нижний предел взрывчатости 10…15 г/м^3.

г) Состав атмосферы. Присутствие метана в атмосфере повышает опасность воспламенения пыли и распространения взрыва.

При содержании метана 2,5…3% метана, нижний предел взрывчатости пыли понижается до 3…5 г/м^3.

д) Зольность пыли. Присутствие золы в пыли снижает ее взрывчатость и при зольности 40…90% пыль теряет свойство взрываться.

е) Влажность пыли действует как инертная добавка, т.е. понижает способность пыли переходить во взвешенное состояние.

3.2.3. Особенность и последствия взрывов угольной пыли в шахтах

Воспламенение пыли может принимать форму вспышки пылевого облака со скоростью горения до 10 м/с и взрыва со скоростью распространения более 100 м/с, при котором ударная волна движется впереди пламени.

При этом наблюдается *динамический эффект* (связанный с разрушением вентиляционных сооружений, опрокидыванием струи, образованием завалов и т.д.) *и тепловой* (загорание деревянной крепи и других го-

рючих материалов, ожоги рабочих).

Кроме того, образуется оксид углерода (1,8% и более), что вызывает отравление людей, зачастую со смертельным исходом.

Взрыв угольной пыли, как и метана, сопровождается прямым и обратным ударами.

3.2.4. Меры борьбы со взрывами угольной пыли

Все мероприятия разделяются на 3 группы.

1) Меры, обеспечивающие снижение запыленности горных выработок и воздуха:

- применение машин крупного скола;
- увлажнение угля в массиве;
- пылеподавление путем орошения, применение пены;
- отсос и улавливание пыли в местах образования;
- смачивание и уборка осевшей пыли;
- эффективное проветривание;
- предотвращение поступления пыли с поверхностей.

2) Меры, препятствующие появлению источников воспламенения пыли (пылевой режим). К ним относятся все мероприятия газового режима.

3) Меры по нейтрализации взрывчатых свойств отложившейся угольной пыли и локализация взрывов пыли, основанные на применении воды и инертной пыли.

Меры, основанные на применении воды, обязательны в местах интенсивного пылеобразования:

– конвейерные выработки;

– участки выработок, примыкающих к забою, погрузочным пунктам, опрокидывателям.

Мероприятия, основанные на применении воды, включают в себя:

– побелку выработок известково-цементным раствором;

– связывание осевшей угольной пыли смачивающее-связывающим раствором;

– связывание осевшей угольной пыли туманообразующими завесами (участки вентиляционных штреков 200 м за лавой);

– установка водяных завес (вентиляционный штрек в 10…15 м);

– установка водяных заслонов.

Мероприятия, основанные на применении инертной пыли, включают осланцевание горных выработок и установку сланцевых заслонов.

Инертная пыль не должна содержать более 1% горючих веществ и более 10% SiO_2.

Для локализации взрывов пыли применяют сланцевые и водяные заслоны. Ими изолируются: очистные забои, отдельные забои подготовительных выработок, отдельные пласты, крылья шахтного поля, около-

ствольные дворы, конвейерные выработки, склады ВМ.

Водяные заслоны должны устанавливаться на расстоянии не менее 75 и не более 250 м, а сланцевые – не менее 60 и не более 300 м от забоев очистных и подготовительных выработок, сопряжений штреков с квершлагами, уклонами и бремсбергами.

В конвейерных выработках устанавливают водяные заслоны на расстоянии не более 250 м один от другого.

Основные параметры *водяных заслонов*:

– емкость сосуда – не более 80 л;

– общая длина заслона – не менее 30 м;

– расстояние между кровлей и верхней кромкой сосуда не менее 150 мм и не более 600 мм.

Сланцевый заслон состоит из ряда опрокидывающихся полок жесткой конструкции шириной не менее 250 и не более 500 мм. Расход пыли – 400 кг/м^2 выработки в свету. Длина заслона – не менее 20 м.

Контроль пылевзрывобезопасности горных выработок производится визуально ежесменно лицами надзора участка и лабораторным путем.

Выработка считается опасной, если на боках, кровле, почве и др. поверхностях будет обнаружена видимая сухая пыль или под действием воздушной струи, создаваемой насосом, будет появляться заметное на глаз пылевое облако.

Не реже одного раза в квартал пробоотборщиками ГВГСС производится отбор проб угольной пыли или мелочи, а в осланцованных выработках – отбор проб пыли, для определения в лаборатории содержания в них внешней влаги и негорючих веществ.

3.3. Карьерная пыль

3.3.1. Образование пыли в карьерах

Технологические процессы при разработке месторождений открытым способом сопровождаются интенсивным пылеобразованием. Основными из них являются:

- бурение скважин;
- массовые взрывы по разрушению горного массива;
- выемочно-погрузочные работы;
- работа автотранспорта;
- работа конвейерного транспорта.

Интенсивными внешними источниками пылевыделения являются отвалы пород, временные отвалы некондиционных полезных ископаемых, гидроотвалы и хвостохранилища. При укладке пустых пород и некондиционного сырья в отвалы используют бульдозерное отвалообразование (при автотранспорте), экскаваторное отвалообразование (при железнодорожном транспорте) и отвалообразователи (при конвейерном транспорте).

Одним из главных источников образования пыли в карьерах является проведение массовых взрывов при разрушении горного массива. При массовых взрывах масса взрывчатых веществ (ВВ), которая одновременно используется, может превышать несколько сотен тонн. В результате взрыва в карьере образуется пылегазовое облако значительных размеров, которое вмещает большие концентрации пыли и отравляющих газов.

При массовых взрывах постепенно образуются три вида облаков:

– первичное облако;

– повторное облако;

– облако, которое образуется при подъеме осевшей пыли за счет ударной волны и сейсмических колебаний.

Пылегазовое облако содержит значительное количество (до 35%) тонкодисперсной (респирабельной) пыли с размерами частиц 1,4-10 мкм. Эта фракция следует за линиями тока воздуха, поэтому рассеивается в атмосфере сильнее других, медленнее оседает, а ее доля в осевшей пыли растёт с удалением от взорванного блока. С течением времени доля тонкой пыли в пылевом облаке достигает 100%, поскольку крупные частицы довольно быстро оседают в атмосфере.

Первичное облако образуется в результате выброса пылегазовой смеси из устья буровых скважин со скоростью 100...1000 м/с. На высоте 10...15 м от поверхности взрыва скорость выброса становится сопоставимой со скоростью ветра за счет динамичного фактора. Дальнейший подъем пылегазового облака происходит вследствие действия гравитационных сил, которые возникают за счет разности температур газообразных продуктов и окружающего воздуха. Некоторое время облако поднимается с возрастающей скоростью, которая вызывается вертикальным (температурным) ускорением

$$a = \frac{t_0 - t_c}{t_c},$$

где t_0 – средняя температура газов облака, ^oC; t_c – температура воздуха окружающей среды, ^oC.

Далее аэрозольное облако начинает охлаждаться за счет адиабатического ее расширения и присоединения (втягивания) к ее объему более холодных масс окружающего воздуха. Этот фактор имеет доминирующее значение.

Установлено, что при достижении максимальной высоты подъема за счет указанных факторов, объем облака увеличивается в 5...6 раз при общем увеличении первичного объема в 900...1000 раз. Подъем пылегазового облака происходит к уровню конвекции до тех пор, пока его температура не уравняется с температурой окружающего воздуха.

Повторное пылегазовое облако образуется после взрыва в зоне, куда отбрасываются пыль и газы из подошвы уступа, в радиусе разлета кусков породы.

Источник образования пылегазового облака третьего типа распола-

гается в зоне поднятия прежде осевшей пыли.

Начальная концентрация пыли в облаке может достигать 4000 мг/м^3, при этом загрязняется до опасной концентрации около 4 млрд. м^3 атмосферного воздуха. При скорости ветра 2 м/с продолжительность рассеивания пылегазового облака составляет более 4 ч. Концентрация оксидов азота в зоне взрыва превышает ПДК на протяжении 6...10 ч, а оксида углерода – на протяжении 100...200 ч.

Газовыделение увеличивается при выемочно-погрузочных работах, при этом газы выделяются как из отбитой породы, так и из ковша экскаватора, а также из кузова самосвала. Продолжительность простоев оборудования вследствие повторных газовыделений достигает значительных величин. Так, в условиях Кривбасса она составляет 15...20% от общей продолжительности простоев в период выполнения взрывных работ. При проведении таких работ на глубинах более чем 400-500 м пылегазовое облако может не достичь верхней отметки карьера и поэтому не вызывает длительного загрязнения карьерного пространства. Так, при взрыве 500 т ВВ и стойком состоянии атмосферы (при градиенте – 1º*С*/100 м) высота подъема пылегазового облака не превышает 260 м, а при большей стойкости (температурный градиент – 2º*С*/100 м) – соответственно 170 м. Следует отметить, что при значениях температурного градиента, которые наиболее часто наблюдаются на практике, а именно + 0,7º*С*/100 м, пылегазовое облако может подняться на высоту до 1400…1500 м. В связи с этим, в глубоких карьерах необходимо организовывать регулярные градиентные наблюдения, которые бы позволили избежать продолжительных простоев после массовых взрывов.

3.3.2. Борьба с карьерной пылью как профессиональной вредностью

Борьба с пылью, как вредным фактором, осуществляется проведением комплекса мероприятий:

а) технических;

б) медико-санитарных;

в) социально-бытовых.

Технические мероприятия по борьбе с пылью делятся на 5 групп:

1) предотвращение уменьшения образования пыли при выполнении технологических процессов (использование технологий и машин с минимальным образованием пыли, гидродобыча, высокочастотное бурение скважин, беспламенное подрывание зарядов и т.п.);

2) борьба с пылью, которая образуется в процессе работы машин, механизмов и при взрывных роботах (мокрое бурение скважин, орошение мест пылеобразования водой, сухое пылеулавливание, подавление пыли с использованием пены);

3) очистка воздушных потоков от взвешенной пыли (орошение пылевого потока, очистка в электрофильтрах, акустическая коагуляция,

обеспыливающая вентиляция и др.);

4) борьба с пылью, осевшей на бортах и дне карьера (сбор пыли пылесборными комбайнами, смывание или связывание пыли в местах ее образования);

5) общетехнические мероприятия (перевод на дистанционное управление машинами и механизмами, озеленение, асфальтирование и др.).

Борьба с пылью при массовых взрывах осуществляется за счет техно-логических и организационных мероприятий, гидрообеспыливания, подавления пыли пеной, использования искусственной вентиляции.

К организационным мероприятиям следует отнести своевременное проведение массовых взрывов в карьерах, если обеспечивается сокращение времени рассеивания пыли. Как правило, массовые взрывы должны приурочиваться к периодам максимальной ветровой активности (около 11...14 часов дня), что отвечает увеличению скорости ветра на 0,7...1,2 м/с. В Кривбассе это сокращает продолжительность проветривания на 15...20%.

К техническим мероприятиям относятся:

1) использование для взрывных работ глубоких буровых скважин маленького диаметра. Это уменьшает высоту подъема первичного облака и снижает пылевыделение в карьерное пространство. При переходе на высокие уступы можно уменьшить высоту подъема пылегазового облака на 20% и сократить выброс пыли на 10...20%;

2) проведение взрывных работ в зажатой среде на неубранную горную массу. При толщине буферного пласта 20...30 м существенным образом уменьшается объем повторного пылегазового облака.

Гидрообеспыливание предусматривает использование водной забойки буровых скважин, орошение разрушенного взрывом блока и пылегазового облака.

Подавление пыли в пылегазовом облаке может осуществляться с использованием гидрозавес или с помощью установок импульсного дождевания. В этом случае эффективность пылеподавления достигает 70...80%.

Возможно использование искусственных осадков, которые создаются мощными дождевальными установками-вентиляторами оросительного типа (НК-12КВ, ПВУ-6, ОВ-3, УМП-1 и др.). Совместно с орошением целесообразно использовать местное искусственное проветривание застойных зон, которые прилегают к блоку, где выполняются взрывные работы.

Перед взрывом необходимо проводить орошения водой поверхности карьера, на которую будут выпадать пылевые частички, с добавлением в воду поверхностно-активных веществ (ПАВ). При отрицательных температурах для орошения используют растворы солей, а также паровоздушную смесь. На поверхность блока после выполнения взрывных работ можно наносить воздушно-механическую пену.

Для сокращения времени проветривания возможно проведение полива горной массы водой, это позволяет уменьшить газовыделение на

25...40%.

При работе буровых станков с механическим разрушением для снижения пылевыделения возможно использование бурения на оптимальных режимах и с использованием специальных долот, мокрых способов пылеподавления водой, воздушно-водной смесью, пеной и др.

При работе станков шарошечного бурения основным направлением борьбы с пылью является использование мокрых способов пылеулавливания и пылеподавления.

Хорошие результаты при испытании показала воздушно-водная система конденсационного пылеподавления на станках 2СБШ-200.

Для станков шарошечного и ударно-вращательного бурения разработаны пылеулавливающие установки (устройства) с гравитационными, инерционными, поглощающими и пористыми пылеуловителями. Одна из пылеулавливающих установок, разработанных ВНИИБТГ, имеет два параллельно установленных циклона типа ЦН-15, которые работают с пульсирующей продувкой и оснащенны рукавными фильтрами из многослойной ткани.

При выемочно-погрузочных работах в карьере наибольшее количество пыли выделяется во время работы экскаваторов, немного меньше – при работе бульдозеров, колесных или тракторных погрузчиков. Интенсивность пылевыделения во время работы бульдозера ДЭТ-250 по сухой горной массе составляет на угольных карьерах 1600...2000 мг/с, на рудных карьерах – 200...250 мг/с, на карьерах строительных материалов 1500...2500 мг/с, а при увлажненных строительных материалах 200...400 мг/с. Средняя запыленность воздуха в кабинах бульдозеров для условий карьеров Кривбасса достигает 2,3...6,6 мг/м^3.

При выемочно-погрузочных работах в карьере особенно неблагоприятные условия возникают в траншеях и съездах.

Снижение запыленности воздуха во время этих работ может осуществляться путем выноса пыли из экскаваторного забоя с помощью искусственной вентиляции, осаждением пыли за счет ее коагуляции, а также увлажнением пыли, которая находится внутри массива или в обрушенных породах.

Для искусственной противопылевой вентиляции используются передвижные вентиляционные установки со свободными струями. Для коагуляции и увеличения веса используют водовоздушные струи. Для увеличения веса частиц пыли, которые находятся в воздухе в свободном состоянии, можно конденсировать на них влагу за счет подачи в забой водяного пара. Наиболее часто для снижения интенсивности пылевыделения используют увлажнение горной массы при работе экскаваторов.

Для уменьшения запыленности воздуха ограничивают высоту уступов, которые вынимаются за один раз, или высоту временного состава пород. Эта высота не должна превышать высоту черпания экскаватора. Целесообразно уменьшение высоты разгрузки ковша и угла поворота экскаватора при погрузке.

В угольный массив возможно нагнетания воды, или поверхностно-активных веществ.

На карьерах и разрезах возможно использование автомобильного, железнодорожного, конвейерного транспорта. В отдельных случаях используют гидротранспорт, скиповый подъем, подвесные канатные дороги, рудоспуски и др.

Для уменьшения образования пыли во время движения автомобилей применяют усовершенствованные покрытия автодорог, увлажнение их поверхности, обработку покрытия автодорог разными вяжущими растворами и др.

Для сбора просыпей горной массы, а также грязи от колес автомобилей, используют поливочные и уборочные машины с металлическими щетками для чистки. Для уменьшения пылевыделения на дорогах, покрытых щебнем, используют увлажнение их поверхности поливочными машинами ПМ-130, машинами на базе автомобилей КрАЗ-256, БелАЗ-540, БелАЗ-548, установками УМП-1 и др. Для повышения эффективности пылеподавления на дорогах используют разные способы обработки верхнего слоя полотна дороги вяжущими и другими материалами. Для этого используют хлористый кальций, сульфитно-спиртовую барду, нефтяные продукты и др.

При конвейерном транспорте используют разнообразные укрытия для предотвращения просыпей и сдувания пыли. Эффективными являются такие укрытия, которые полностью закрывают как рабочую, так и холостую ветви конвейера и предупреждают сдувание пыли из транспортируемого материала воздушным потоком. Для очистки конвейерной ленты и барабанов от прилипших или примерзших частиц транспортной массы возможно применения скребковых, роликовых, щеточных, вибрационных, пневматических и комбинированных устройств. Наиболее распространенными являются скребковые устройства разных конструкций. Наиболее эффективным являются комбинированные устройства. Возможно использование физико-химических, термических и других способов очистки ленты. На перегрузочных узлах применяются укрытия, обеспыливание, пылеподавления и др.

Интенсивными внешними источниками пылевыделения являются отвалы пород, временные составы некондиционных полезных ископаемых, гидроотвалы и хвостохранилища. При укладке пустых пород и некондиционного сырья в отвалы используют бульдозерное отвалообразование (при автотранспорте), экскаваторное (при железнодорожном транспорте) и с использованием отвалообразователей (при конвейерном транспорте).

Интенсивными источниками пылеобразования являются значительные по размерам незакрепленные поверхности карьеров. По данным замеров концентрация пыли на хвостохранилищах Криворожских ГОКов достигает 500...1000 мг/м^3 при скорости ветра 8...10 м/с.

Для борьбы с пылеобразованием на гидроотвалах и хвостохранили-

щах возможно использование следующих способов:

– установка ветрозащитных щитов;

– укладка разных материалов на поверхности, из которых не выделяется пыль;

– засыпка поверхностей;

– нанесение на поверхности высоковязких растворов, гидропаст;

– периодическое увлажнение поверхностей, обработка растворами органических и неорганических веществ, обработка коллоидными растворами полимеров, электризация верхнего пласта, намагничивание, термическая обработка и др.

Вопросы для самоконтроля

1. Классификация пыли.
2. Влияние пыли на организм человека.
3. Нормирование содержания пыли в воздухе.
4. Гигиеническая оценка условий труда по пылевому фактору.
5. Основные свойства пыли.
6. Взрывчатые свойства угольной пыли.
7. Факторы, влияющие на взрывчатость угольной пыли.
8. Особенность и последствия взрывов угольной пыли в шахтах.
9. Меры борьбы со взрывами угольной пыли.
10. Борьба с пылью как с вредным фактором.
11. Общие сведения о карьерной пыли.
12. Механизм образования пылегазовых облаков в карьерах.
13. Борьба с карьерной пылью как профессиональной вредностью.

РАЗДЕЛ 4. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в четвертом разделе пособия:

- определять параметры теплового режима шахт, рудников и карьеров;
- анализировать факторы, влияющие на тепловой режим шахт и рудников;
- рассчитывать температуру горных пород на глубине H;
- составлять тепловой баланс шахт и рудников;
- определять характер изменения температуры воздуха в шахте;
- находить значения абсолютной и относительной влажности воздуха;
- улучшать тепловые условия в шахтах без искусственного охлаждения воздуха;
- разрабатывать мероприятия по искусственному охлаждению рудничного воздуха;
- анализировать и внедрять различные схемы охлаждения воздуха;
- рассчитывать количество тепла, получаемое поверхностью карьера от инсоляции;
- определять температурные условия на рабочих местах в карьере;
- охарактеризовать термический режим карьера;
- отображать температурную стратификацию атмосферы карьера;
- прогнозировать образование туманов в карьере и разрабатывать мероприятия по борьбе с ними;
- осуществлять мероприятия по кондиционированию воздуха на рабочих площадках в карьере;
- нормализовать параметры воздуха в кабинах и кузовах горно-шахтного оборудования.

4.1. Тепловой режим шахт. Нормализация микроклимата шахт

Тепловой режим шахты – это метеорологические (климатические) условия, сложившиеся в горных выработках.

Тепловой режим определяется температурой, влажностью и скоростью движения воздуха, которые оказывают совместное действие на организм и в значительной степени предопределяют самочувствие и работоспособность горнорабочих в шахте.

Опыт работы глубоких шахт показывает, что ведение добычных работ осложняется высокой температурой рудничной атмосферы, приводит к снижению производительности труда (на 20…30%), отрицательно сказывается на здоровье рабочих, понижает устойчивость организма к простудным и инфекционным заболеваниям, притупляет внимание, что влечет за собой повышение уровня травматизма.

В условиях высоких температур и повышенной влажности возникают случаи перегрева организма и тепловых ударов.

Изучение теплового режима шахты необходимо для создания благоприятных санитарно-гигиенических условий труда.

4.1.1. Температура воздуха

На температуру воздуха в шахте оказывают влияние следующие факторы:

– сжатие воздуха в воздухоподающем и расширение его в воздуховыдающем стволах;

– температура горных пород и теплообмен между воздухом и горными породами;

– интенсивность проветривания;

– разного рода экзотермические и эндотермические процессы, связанные с выделением и поглощением тепла;

– климатические параметры воздуха на земной поверхности.

Естественное сжатие воздуха повышает его температуру при движении вниз примерно на 1ºС на каждые 100 м глубины. При подъеме воздуха из шахты он охлаждается примерно на ту же величину.

Известно, что температура горных пород с увеличением глубины возрастает. Интенсивность повышения температуры горных пород с глубиной характеризуется *геотермической ступенью*, которая выражается числом метров по вертикали, соответствующим повышению температуры горных пород на 1ºС. Геотермическая ступень изменяется от 10 до 200 м/ºС. Для Донбасса она равна 34…39 м/ºС.

Расчет ожидаемой температуры на глубине H производится по формуле:

$$t_н = t_{н.з.} + \frac{H - h_{н.з.}}{H_Г}, \text{ ºC}$$

где $h_{н.з.} \cong 20…30$ м – глубина нейтрального слоя (зоны с постоянной температурой горных пород); $t_{н.з.} = 7…9$ºС – температура пород нейтрального слоя, равная среднегодовой температуре воздуха для данной местности; $H_Г$ – геотермическая ступень, м/ºС.

На глубине 1500 м температура горных пород в Донбассе достигает 54…56ºС.

Количество тепла, отдаваемое горными породами воздуху, зависит от разности температур пород и воздуха, теплофизических характеристик пород, скорости движения воздуха и других факторов.

Расчет теплообмена представляет известные трудности вследствие изменчивости всех параметров во времени и в пространстве.

На небольшой глубине воздух, который поступает в шахту, нагревает породы летом и охлаждает их зимой. На более значительной глубине охлаждение пород имеет место в течение всего года. В обоих случаях вокруг выработок создается зона, в пределах которой температура иная, чем в массиве.

Слой породы, температура которого меняется в течение года, называется *тепловыравнивающей рубашкой*. Наличие охлаждающей оболочки пород вокруг воздухоподающего ствола, квершлага и др. выработок обуславливает не-

значительный рост температуры воздуха в этих выработках. Напротив, температура воздуха резко возрастает в очистном забое, где породы обнажаются каждый день. Наиболее высокая температура воздуха наблюдается в тупиковых забоях длинных подготовительных выработок.

При длительном проветривании толщина тепловыравнивающей рубашки может достигать 10…20 м – в песчаниках, 8…10 м – в глинистых сланцах, 3…5 м – в угле.

Примерно на расстоянии 1500 м от воздухоподающего ствола толщина ее становится близкой к 0 (рис. 4.1).

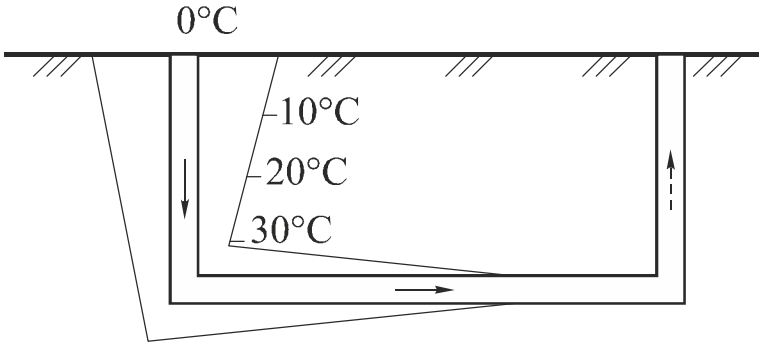


Рис. 4.1. Изменение толщины охлаждающей оболочки

К другим факторам, способствующим росту температуры воздуха, относится:

– окисление горных пород (угля, различных видов руд), гниение крепежного леса;

– выделение тепла из транспортируемого угля и пород, особенно при конвейерном транспорте по выработкам со свежей струей;

– тепловыделения при работе машин и механизмов. Особенно заметно повышение температуры в тупиковых выработках за счет работы комбайнов (на 10…12ºС), вентиляторов (на 2…3ºС);

– тепловыделение при движении шахтных вод;

– прочие причины (тепловыделения людей, взрывные работы, освещение, сезонные колебания температуры наружного воздуха).

Наиболее существенной причиной, снижающей температуру воздуха, является испарение воды (1 г воды при испарении поглощает 2,46 кДж и понижает температуру 1 $м^3$ воздуха на 1,7…1,9ºС).

Тепловой баланс – это распределение выделяющегося в шахте тепла по различным источникам. Для шахт Донбасса глубиной 1000 м он примерно следующий (в %):

- теплоотдача от горных пород – 48,5…50;
- окисление дерева и угля – 28,8;
- от охлаждения полезного ископаемого – 8,6;
- от механической работы и электроэнергии – 8,5;
- прочие источники – 5,6.

Характер изменения температуры воздуха в горных выработках при совместном влиянии различных факторов показаны на рис. 4.2.

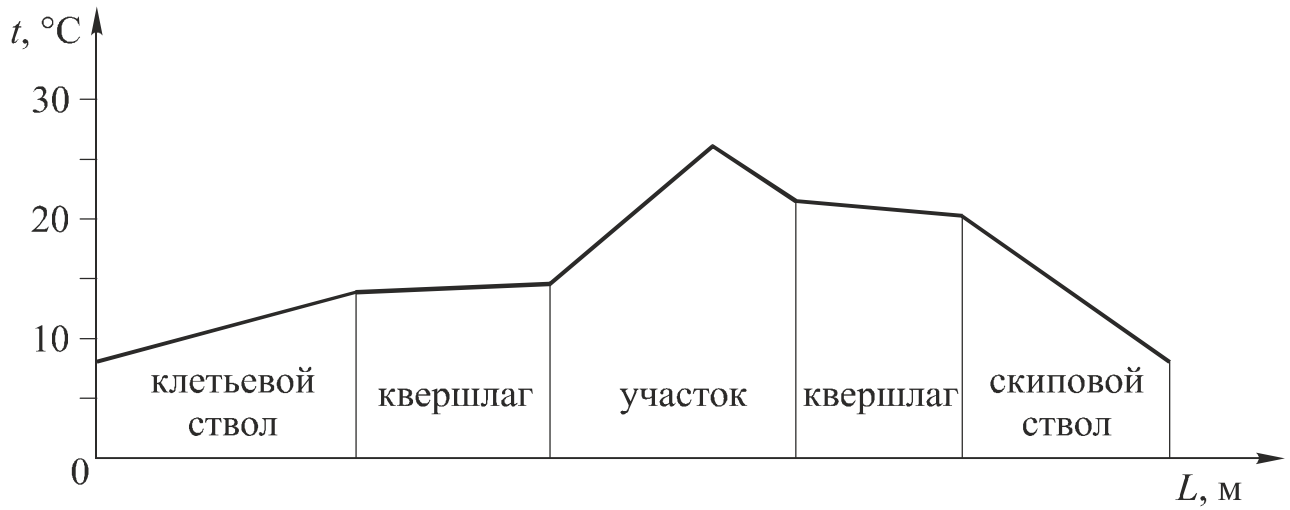


Рис. 4.2. Характер изменения температуры воздуха в шахте

Понижение температуры воздуха в исходящей участка обусловлено притоками свежего воздуха за пределами очистного забоя (подсвежение струи).

4.1.2. Влажность воздуха

Влажность воздуха определяется содержанием в нем водяных паров. Различают *абсолютную влажность*, выраженную в г/м^3 и *относительную* – в процентах от полного насыщения единицы объема воздуха при данной температуре

$$\varphi = \frac{g}{g_н} \cdot 100, \%$$

где g – содержание водяного пара в единице объёма воздуха, г/м^3; $g_н$ – содержание водяного пара при полном насыщении единицы объёма воздуха при данной температуре (табл. 4.1), г/м^3.

Таблица 4.1

Зависимость влагосодержания насыщенного пара от температуры воздуха

t, ºС	0	10	40
$g_н$, г/м^3	5	10	50

В обводненных стволах относительная влажность воздуха, даже зимой, когда воздух поступает с минимальным влагосодержанием, достигает 90…95%. Наиболее увлажнен воздух в выработках с исходящей струей. В глубоких шахтах воздух обычно суше вследствие повышения температуры и меньших водопритоков. Это повышает риск взрывов пыли и опасность заболевания силикозом.

Относительная влажность угольных шахт находится в пределах от 70 до 100%. В калийных рудниках, где соль весьма гигроскопична, воздух очень сухой (φ = 15%).

4.1.3. Кондиционирование рудничного воздуха

Кондиционирование рудничного воздуха – это комплекс мероприятий по поддержанию нормируемых параметров микроклимата (в основном температуры, влажности и скорости воздуха), который включает в себя:

– горнотехнические мероприятия, направленные на улучшение тепловых условий в шахтах;

– искусственное охлаждение воздуха с помощью холодильных машин.

Улучшение тепловых условий в шахтах без искусственного охлаждения воздуха

Целесообразно применять во всех шахтах глубиной до 700…750м, за исключением гидрошахт и шахт, разрабатываемых пласты, склонные к самовозгоранию.

Рекомендуются следующие горнотехнические мероприятия:

– увеличение количества воздуха, подаваемого в шахту;

– применение схем вскрытия и подготовки, обеспечивающих сокращение путей движения свежего воздуха к забоям (скважины, секционирование схем, групповые воздухоподающие выработки);

– теплоизоляция стенок воздухоподающих выработок (способ целесообразен для выработок с небольшим сроком службы – 1…2 года и требует надлежащего технико-экономического обоснования);

– снижение тепловыделений от окислений путем замены деревянной крепи металлической или железобетонной, снижение запыленности воздуха, уменьшение времени нахождения горной массы в выработках;

– применение нисходящего проветривания очистных забоев;

– применение закладки вместо обрушения;

– обособленное проветривание крупных электромашинных камер;

– организация транспортирования горной массы по выработкам с исходящей струей.

В глубоких шахтах с помощью указанных мер не представляется возможным снизить температуру воздуха до санитарных норм и прибегают к искусственному охлаждению воздуха с помощью холодильных машин.

Расчеты показывают, что в диапазоне глубин 800…1050 м необходимо удвоить расход воздуха по шахте, чтобы поддерживать одинаковую температуру. При этом мощность на проветривание пришлось бы увеличить в 8 раз. К тому же возможности увеличения скорости воздуха в горных выработках газовых шахт будут исчерпаны.

Искусственное охлаждение воздуха

Наибольшее распространение для охлаждения воздуха получили компрессорные холодильные машины, в которых в качестве хладагента используются фреоны (фреон-12 и фреон-22) с температурами сжижения соответственно 29,8ºС и 40,8ºС (рис. 4.3, 4.4).

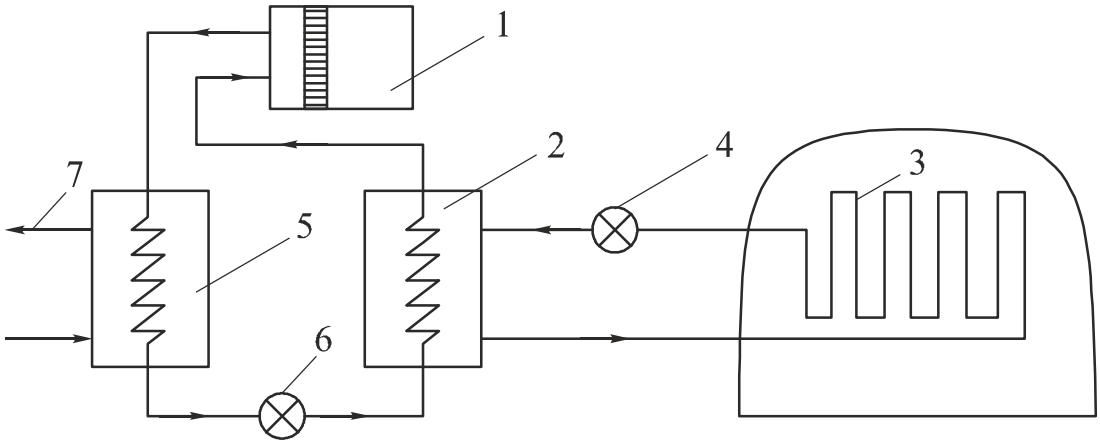


Рис. 4.3. Принципиальная схема холодильной установки с фреоном-12: 1 – компрессор; 2 – испаритель; 3 – воздухоохладитель; 4 – насос хладоносителя; 5 – конденсатор; 6 – насос хладоагента с дросселирующим вентилем; 7 – трубопровод для отвода тепла конденсации

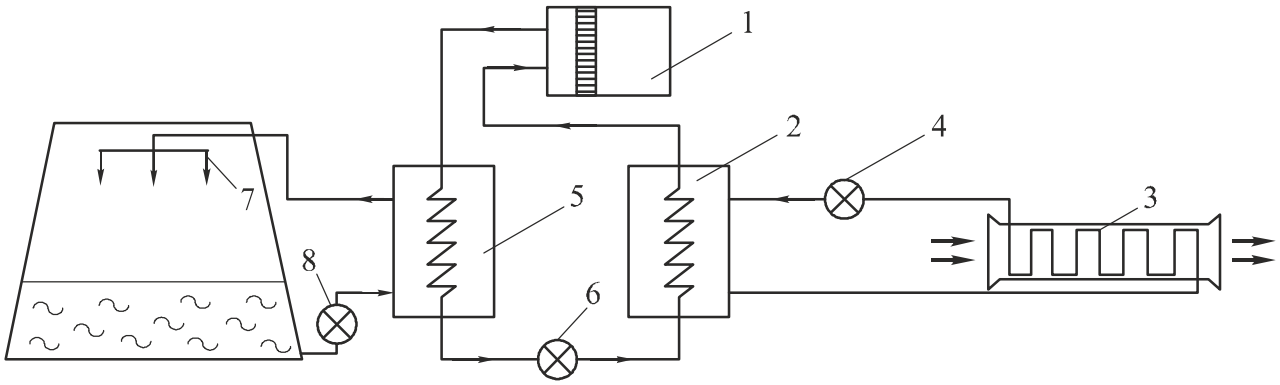


Рис. 4.4. Принципиальная схема холодильной установки с фреоном-22: 1 – компрессор; 2 – испаритель; 3 – воздухоохладитель; 4 – насос хладоносителя; 5 – конденсатор; 6 – насос хладоагента с дросселирующим вентилем; 7 – охлаждающее устройство, 8 – насос

*Принцип работы***:** Пары фреона поступают в компрессор 1, где они сжимаются до давления конденсации и направляются в конденсатор 5. В конденсаторе хладагент превращается в жидкость, отдавая тепло конденсации охлаждающей воде. Полученная жидкость подается насосом 6 через дросселирующий клапан (вентиль) в испаритель 2, где фреон, находясь под давлением кипения, испаряется. Процесс идет с поглощением теплоты. Температура хладоносителя, в качестве которого чаще всего используют воду или растворы хлористого кальция (натрия), понижается. Температура замерзания растворов кальция или натрия составляет – 55ºС. В испарителе фреон превращается в исходное состояние – пар, который отсасывается компрессором. Хладоноситель подается насосом 4 к воздухоохладителю 3, где и происходит охлаждение воздушного потока.

Бывают воздухоохладители с распылением холодной воды, которая поглощает теплоту проходящего воздуха, а также ребристотрубные по типу радиаторов больших размеров, снабженных вентилятором.

В зависимости от места расположения воздухоохладителей различают следующие схемы охлаждения рудничного воздуха:

Централизованная – воздухоохладители располагаются на поверхности или в специальных выработках околоствольного двора и через них проходит весь воздух, подаваемый в шахту или часть его (рис. 4.5).

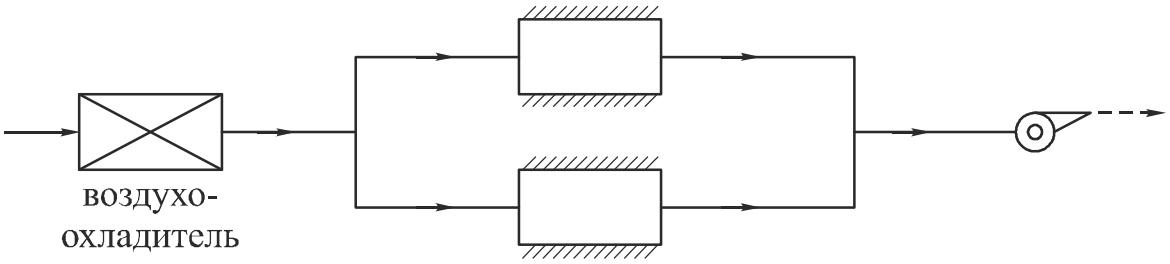


Рис. 4.5. Центральная схема охлаждения воздуха

Эта схема рациональна при небольшом расстоянии между забоями и воздухоподающим стволом.

Групповая (полуцентрализованная) – воздухоохладители располагаются на квершлаге или групповом штреке и обслуживают группу пластов или участков (рис. 4.6).

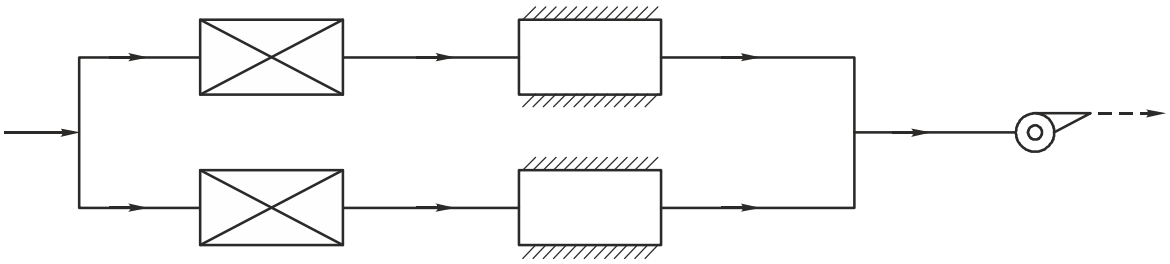


Рис. 4.6. Групповая схема охлаждения воздуха

В этом случае воздух охлаждается в нескольких пунктах подземных выработок или охлаждается только часть воздуха подаваемого на горизонт.

Местная – воздухоохладитель обслуживает, как правило, один участок, например очистной или подготовительный забой (рис. 4.7).

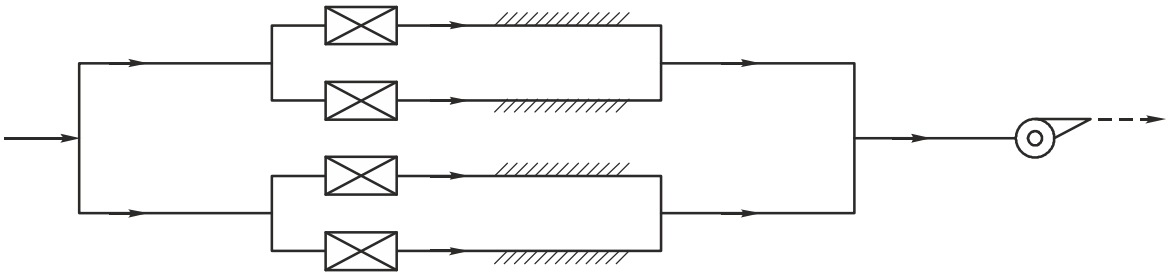


Рис. 4.7. Местная схема охлаждения воздуха

При местной схеме охлаждения могут применяться как стационарные, так и передвижные воздухоохладительные установки.

Ступенчатая – состоит в последовательном охлаждении воздуха рассре-

доточенными по одному из маршрутов воздухоохладителями (комбинация предшествующих схем).

В практике кондиционирования воздуха существует несколько схем размещения холодильного оборудования.

а) Холодильная машина и воздухоохладитель расположены на поверхности.

Достоинства: надежность, безопасность, централизация, высокая холодопроизводительность, простота отвода тепла конденсации.

Недостатки: приходится охлаждать весь воздух, слабая эффективность вследствие нагрева воздуха при движении до рабочих мест, возможность простудных заболеваний в стволе, околоствольном дворе и квершлагах.

б) Холодильная машина расположена на поверхности, а воздухоохладитель – под землей.

Достоинства: те же, что и в схеме (*а*).

Недостатки: высокое давление в системе подвода хладоносителя (свыше 10 МПа), сложность монтажа и эксплуатации, большая протяженность трубопроводов и потеря холода на пути движения хладоносителя

в) Холодильная машина и воздухоохладитель расположены под землей (на рабочем горизонте). Наиболее целесообразна и эффективна для глубоких шахт.

Достоинства: уменьшаются потери холода, сокращается длина трубопроводов, применяются трубопроводы низкого давления.

*Недостатки***:** сложность отвода тепла конденсации, необходимость сооружения камер больших объемов.

Холодопроизводительность установленных на поверхности холодильных машин колеблется от $4 \cdot 10^6$ до $40 \cdot 10^6$ кДж/ч. Холодопроизводительность шахтных машин составляет: МФ-700 – $2{,}5 \cdot 10^6$ кДж/ч; МФ-350 – $1{,}5 \cdot 10^6$ кДж/ч; ШХТМ-1300 – $5{,}5\ 10^6$ кДж/ч.

На шахтах применяются так же передвижные кондиционеры КПШ-40 и КПШ-3 холодопроизводительностью, соответственно $0{,}2 \cdot 10^6$ и $0{,}4 \cdot 10^6$ кДж/час. Компрессор, конденсатор и воздухоохладитель смонтированы на общей раме и вагонеточных скатах.

4.2. Микроклимат карьеров

4.2.1. Общие сведения о микроклимате карьеров

Микроклимат карьеров характеризуется следующими параметрами воздуха: температурой, влажностью, скоростью его движения, атмосферным давлением, интенсивностью солнечного излучения. При этом параметры воздуха в карьере беспрерывно изменяются.

В результате влияния притока лучевой энергии Солнца на земную поверхность, теплообмена и влагообмена в атмосфере, перемещения воздушных масс, рельефа местности, а также наличия водных бассейнов, лесных массивов и другой растительности, наличия снегового покрытия, ледников и др., имеет место неодинаковый нагрев, охлаждение, увлажнение и прочие местные изме-

нения состояния воздуха. Под влиянием этих факторов главные метеорологические показатели, такие, как температура, влажность и плотность воздуха, скорость и направление ветра значительно изменяются в приземном слое атмосферы.

Источники тепла в карьере. Воздух в карьере может как нагреваться, так и охлаждаться. Основными источниками нагревания воздуха, кроме естественного адиабатического сжатия вышерасположенными слоями, являются: инсоляция поверхности карьера, пожары и прочие окислительные процессы, эндогенное тепло горных пород. Источниками охлаждения карьерного воздуха являются снеговое покрытие и холодные поверхности карьера.

Инсоляция (облучение солнцем бортов и дна карьера) – это значительный источник внешнего тепла в карьере.

Количество тепла, которое получила единица площади поверхности карьера от инсоляции в единицу времени, определяется по уравнению

$$q = b \cdot (1 - A_k) \cdot cos\,\alpha_c \text{, вт,}$$

где b – количество лучистой энергии в единицу времени на единицу поверхности, перпендикулярной относительно лучей, вт; A_k – коэффициент отражения, или альбедо горных пород (для Кривого Рога A_k = 0,045...0,144); α_c – угол падения солнечных лучей на поверхность, град.

Вследствие разной инсоляции противоположных бортов карьера на протяжении суток их температура изменяется, при этом северные борта лучше облучаются солнцем и потому имеют более высокую температуру. Нагретые таким образом борта карьера в свою очередь отдают тепло карьерному воздуху. Непосредственное нагревание солнцем карьерного воздуха незначительно, поэтому температура воздуха над северным бортом выше, чем над южным.

К экзотермическим процессам относят окисления угля и боковых пород. При сгорании 1 кг угля выделяется в среднем 20...24 кДж тепла. Большое количество тепла выделяется в карьерный воздух при пожарах. В некоторых карьерах площади отвалов и оголенных угольных пластов, охваченных пожарами, могут достигать десятки тысяч квадратных метров и значительно повышать температуру воздуха.

В зависимости от климатических и геологических условий температура неохлажденных горных пород в карьере на глубине 100 м на протяжении всего года может составлять 4...12ºС, а на глубине 300 м может быть 7...18ºС. В глубоких карьерах приток эндогенного тепла является одним из основных факторов, который определяет вид температурной стратификации карьерного воздуха.

При радиационном охлаждении (путем излучения) поверхности карьера, или при предшествующем охлаждении его холодным внешним воздухом, борта и дно могут вызвать довольно значительное охлаждение сопредельных слоев воздуха. Зимой борта карьера в случае покрытия их снегом, который отражает до 50% солнечной радиации, могут значительно охлаждать ближайшие к ним слои воздуха. Кроме того, большое количество тепла расходуется на таяние снега весной, что также содействует охлаждению карьерного воздуха.

Температура воздуха в карьере определяется в основном внешним со-

стоянием атмосферы района. Повышение температуры зависит от глубины карьера, солнечной радиации, внутренних источников тепловыделения (тепловозы, электровозы, станки огневого сверления и прочие машины). Обычно температура воздуха в карьере выше, чем на уровне земной поверхности. Изменение температуры воздуха в карьерах и на поверхности обычно имеет регулярный суточный и годовой ход, но идет с некоторым отставанием при облучении солнечными лучами и отличается более высокими температурами в карьере за счет адиабатического нагрева при увеличении глубины карьера.

В солнечные дни наблюдается отставание в повышении температуры воздуха в нижней части карьера в утреннее время по причине относительно более позднего восхода солнца в глубокой его части. В пасмурные дни вследствие маленького прироста температуры в дневные часы суток отставание температуры такого рода не наблюдается. Наибольшая амплитуда суточного изменения температур на поверхности имеет место в летний и осенний периоды года и составляет 12...13ºС, а отдельных районах – 20ºС. Наименьшая амплитуда колебания температур наблюдается зимой. Наибольшая разность между максимумом и минимумом температур воздуха за сутки наблюдается в пасмурную погоду. Перепад температур воздуха в карьере на облученном борту достигает 4...4,5ºС в сравнении с необлученным, а перепад температуры поверхности грунта 9...13ºС. За счет разницы температур воздуха возле освещенных солнцем и затемненных бортов карьера иногда возникают местные потоки воздуха на всем протяжении карьера в направлении от холодного борта к облученному со скоростью до 5...6м/с при скорости ветра на поверхности 1...2 м/с.

Температурные условия на открытых площадках карьера определяются температурой окружающего воздуха, а температурные условия в закрытых помещениях, кабинах экскаваторов, автосамосвалов, локомотивов, бульдозеров, в помещениях конвейерных галерей и др. зависят как от температуры окружающей среды, так и от интенсивности инсоляции, степени поглощения солнечной радиации стенками помещений, тепловой изоляции стенок, количества тепла, которое поступает от работающего оборудования и светильников, интенсивности вентиляции и других факторов. В связи с этим, неблагоприятные условия на рабочих местах могут возникнуть практически в любых климатических условиях, при этом на всех рабочих местах работников главных профессий температура воздуха на 2...17ºС выше в сравнении с окружающей средой.

Содержимое водяного пара в атмосфере карьера определяется влагоемкостью окружающего воздуха, составом и влажностью горных пород, степени их нагрева, скоростью движения воздуха. Характер изменения абсолютной и относительной влажности на протяжении года и за сутки часто совпадает с амплитудой температур за то же время. Летом относительная влажность воздуха более низкая, а абсолютная влажность более высокая, чем зимой. Увлажнение воздуха вследствие выпаривания сопровождается его охлаждением. С повышением барометрического давления и при увеличении глубины карьера влагопоглощающая способность воздуха постепенно уменьшается.

Суточный ход атмосферного давления в карьерах хорошо согласовывается с его колебаниями на поверхности. Амплитуда колебания барометрического

давления для разных климатических районов отличается между собою.

В Криворожском бассейне согласно данным за 21 год при среднегодовом давлении 100,5 кПа амплитуда колебания давления составляла 2,8 кПа. Колебания давления на протяжении суток не превышает 1%, причем максимальное давление наблюдается дважды: в 18 часов и 22...23 часа.

Наибольшее влияние естественные условия вызовут на персонал, который работает непосредственно под открытым небом. Эта группа работников в карьерах часто испытает влияние высоких и низких температур, интенсивной солнечной радиации, сниженной и чрезмерной влажности воздуха, ливней, сильного ветра. И вдобавок персонал часто работает в атмосфере, загрязненной пылью и газами. К средствам защиты работающих под открытым небом относятся (для забойных рабочих и работающих на отвалах зимой): оборудование теплых передвижных будок для периодического согревания и непродолжительного отдыха, обеспечение рабочих теплой и удобной одеждой; летом – оборудование передвижных навесных устройств для защиты от солнечных лучей в периоды кратковременного отдыха, устройство душевых, использование вентиляционных установок, периодическое орошение отдельных участков карьера, использование эффективных средств борьбы с газами и пылью, обеспечение персонала газированной водой и т.п.

Работники в кабинах машин защищены от непогоды и суровой зимы, однако они испытают влияние газов и пыли, шума и вибрации. Кроме того, на них неблагоприятно отражается резкий перепад температур в кабинах по отношению к окружающей среде.

В настоящее время разработаны и используются достаточно надежные технические средства по благоустройству кабин на карьерном оборудовании, по утеплению и герметизации кабин, а также для подачи в них кондиционированного воздуха, то есть воздух с тепловой обработкой и очисткой от вредных газов и пыли.

Для стационарных закрытых рабочих мест установлены нормы метеорологических условий, которые должны обеспечиваться. Главное внимание обращается на организацию нормального проветривания, отопление в холодный период года, на использование обеспыливающих устройств (в случае необходимости).

Температурная стратификация атмосферы карьеров. Термический режим карьеров формируется под действием температурного поля воздушной среды и температуры горных пород. Особенности термического режима карьера является то, что при отдаче тепла от горных пород к воздуху температура над дном карьера во все сезоны выше, чем на поверхности. При отдаче тепла от воздуха к почве (горным породам карьера) прилегающие слои воздуха охлаждаются, что и приводит к их задерживанию внизу карьера и тем самым формируется развитие инверсии.

Для характеристики термического режима карьера используется средний температурный градиент для слоя «поверхность – дно», который равен

$$\gamma = \frac{100 \cdot (t_\partial - t_n)}{H},$$

где $t_д$ и $t_п$ – температура воздуха соответственно на дне и поверхности карьера, К; H – глубина карьера, м.

Значение среднего температурного градиента γ показывает, на сколько градусов изменяется температура воздуха в карьере при опускании на 100м от поверхности.

В неподвижной атмосфере, в которой нет подвода и отвода тепла (адиабатическое состояние), температура воздуха увеличивается с глубиной на 1ºС на каждые 100м вследствие естественного сжатия нижележащих слоев воздуха. Эпюра температур в вертикальной плоскости в этом случае изображается линией 1 (рис. 4.8). В этом случае средний температурный градиент $\gamma = 1$ (адиабатический), который характеризует безразличное равновесное состояние атмосферы, когда в ней отсутствуют как вертикальные перемещения объёмов воздуха, так и силы, могущие вызвать такое перемещение.

В случае, когда дно и борта карьера отдают тепло воздуху, температура с глубиной будет расти быстрее, чем в состоянии безразличного равновесия. В этом случае средний температурный градиент $\gamma > 1$ (сверхадиабатический), который характеризует неустойчивое состояние атмосферы (линия 2). Так как воздух получает тепло не только от сжатия, но и от нагретых поверхностей карьеров, его плотность будет ниже плотности воздуха на поверхности карьера. Это вызывает вертикальное перемещение объёмов воздуха, а состояние атмосферы характеризуется как неустойчивое.

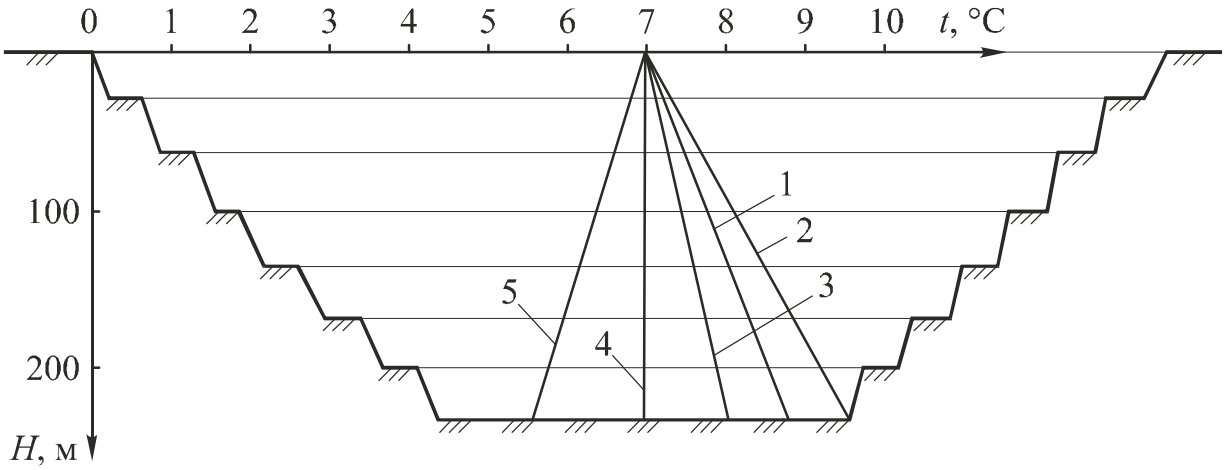


Рис. 4.8. Виды температурной стратификации атмосферы карьеров

Если отвод тепла от воздуха не очень велик, температура его с глубиной может повышаться, но медленнее, чем при адиабатическом состоянии, описываемом линией 1. Эпюра температур при этом будет изображаться линией 3, более пологой, чем линия 1. Средний температурный градиент при этом $\gamma < 1$ (ниже адиабатический), который характеризует устойчивое состояние атмосферы карьера (линия 3).

Если отвод тепла от воздуха равен количеству тепла, получаемому воздухом при его естественном сжатии, его температура с глубиной меняться не будет (линия 4). Средний температурный градиент при этом $\gamma = 0$ (изотермический), который характеризует устойчивое состояние атмосферы карьера.

Возможен случай весьма сильного охлаждения воздуха, когда отвод тепла превышает его генерацию за счёт сжатия. Эпюра температуры будет описываться линией 5, наклон которой противоположен наклону линий 1, 2, 3. Средний температурный градиент $\gamma < 0$ (инверсионный), который характеризует весьма устойчивое состояние атмосферы карьера. Температура воздуха в карьере будет ниже температуры атмосферы на поверхности карьера, его плотность будет выше, вследствие чего наблюдается оседание воздуха в карьере. В этом случае происходит инверсионное перемещение воздушных объёмов и загрязнённый вредными выбросами воздух скапливается в карьерном пространстве.

4.2.2. Образование туманов в карьерах

Туманы в карьерах приводят к ухудшению санитарно-гигиенических условий и безопасности работ. Наличие тумана очень неблагоприятно сказывается на самочувствии человека вследствие высокой влажности воздуха. Кроме того, мелкие капельки воды, из которых складывается туман, являются коагуляторами отравляющих и вредных веществ. Например, наличие в воздухе SO_2 или SO_3 во время тумана приводит к появлению в воздухе пара серной кислоты. Аналогичные явления наблюдаются при присутствии оксидов азота, хлора и некоторых других газов. Кроме отравляющих газов в каплях воды аккумулируются дым, сажа, пыль.

Туманы, которые сопровождаются насыщением атмосферы дымом и другими вредными газами называют в метеорологии *смогами*. В промышленных центрах, где имеют место значительные выбросы указанных вредных веществ, периоды туманообразования характеризуются резким возрастанием количества легочных заболеваний. Туманообразование в карьере связано со снижением видимости, которая очень затрудняет выполнение производственных процессов, в особенности на транспорте. В некоторых случаях туманы приводят к полной остановке работ.

Туман образуется при наличии в воздухе определенного количества водяного пара и достаточно сильном охлаждении воздуха. Появление тумана связано с возрастанием влажности воздуха выше возможной для данных условий. При определенных условиях влажность карьерного воздуха может превышать влажность воздуха за пределами карьера. Возрастание влажности происходит в случаях использования воды для технологических процессов, например, для орошения горной массы с целью пылеподавления. Другими причинами могут быть: выделение воды из горного массива (грунтовые воды), атмосферные осадки в виде дождя, перемещение над карьером масс влажного атмосферного воздуха.

Образование тумана, как правило, связано с инверсией температуры. В зависимости от причин изменения температуры и влажности воздуха наблюдают разные виды туманов. Основными являются:

– *радиационные*, которые возникают вследствие местного охлаждения воздуха;

– *адвективные*, причиной возникновения которых является приток воздуха

из соседних зон;

– *смешанные* или адвективно-радиационные.

Туманообразование в больших масштабах может быть вследствие любой из названных причин. Появление тумана в карьерах происходит главным образом вследствие местного охлаждение воздуха. Инверсия температур во многих случаях вызывается радиационным охлаждением поверхности карьера. Наиболее благоприятными условиями для образования туманов является наличие антициклонической погоды и объединения приземной (развитой в нижних пластах земной атмосферы) инверсии с инверсией внутри карьера, при этом получаются в особенности сильные туманы.

Большое значение имеет адвекция (горизонтальное перенесение) в район карьера теплых масс воздуха, которые находятся в приземном слое, который также оказывает содействие образованию тумана.

В приземном слое воздуха при его радиационном охлаждении образуется отрицательный температурный градиент, то есть получается инверсионный слой, который препятствует вертикальному перенесению воздуха, что приводит к накоплению под указанным слоем инверсии влаги. Появление туманов способствует дальнейшему нарушению вертикального обмена воздуха в карьере вследствие ослабления инсоляции его поверхности.

Туман усиливается при адвекции вследствие перемещения в район карьера теплых масс воздуха и вследствие большого содержания влаги в приземном слое. Такие туманы относятся к адвективно-радиационным.

Если туман образуется вследствие радиационного охлаждения поверхности карьера при отсутствии адвекции теплых воздушных масс, то он относится к туманам радиационного происхождения. Туманы, которые образуются только при адвекции, относятся к туманам адвекционного происхождения. Радиационные туманы в карьере образуются вечером или в ночные времена, если его поверхности интенсивно охлаждаются вследствие отдачи тепла путем радиации и, как следствие, охлаждаются приземные слои воздуха.

Для образования тумана в карьере большое значение имеет температурный градиент воздуха как за пределами карьера, так и в карьерном пространстве. Определение этих градиентов является важным этапом при прогнозировании туманов. Для образования тумана большое значение имеет состояние атмосферы в ее приземном слое. Установлено, что туманы большой и воздержанной интенсивности часто возникают в тех случаях, когда в приземном слое воздуха наблюдается мощный (высотой до 500 м) инверсионный слой. Если указанный слой разделяется прослойками с дополнительным температурным градиентом, тогда смог в карьере, как правило, имеет маленькую интенсивность.

На создание тумана важное влияние имеет загрязнение атмосферы механическими примесями, поэтому в полностью чистом воздухе туман может не образоваться даже при очень сильном его охлаждении и многократном пресыщении его влагой. Твердые частички, находящиеся в воздухе, являются ядрами конденсации водяного пара и оказывают содействие туманообразованию. В этом случае образование тумана происходит даже при незначительном пресыщении влагой. Для того, чтобы началась конденсация влаги на первой стадии

образования капель воды (пока они еще маленькие), воздух должен быть сильно переохлажденным. Опыты показали, что в очищенном от твердых примесей воздухе, конденсация влаги практически не происходит даже по условиям, если упругость водяного пара превышает в несколько раз упругость, которая отвечает перенасыщению. Но в естественных условиях значительное перенасыщение, как правило, не наблюдается. Известно, что конденсация пара в воздухе начинается при очень маленьком перенасыщении, которое обусловлено наличием в воздухе ядер конденсации в виде твердых примесей.

Установлено, что большая часть ядер конденсации состоит из гигроскопических веществ, которыми являются продукты горения, частички соли и др. Из-за того, что ядра конденсации присутствуют в атмосфере карьера практически постоянно, то главными факторами, которые определяют появление тумана, является температура и влажность воздуха.

Одним из основных вопросов успешной ликвидации и предупреждения туманов является их прогноз, который может быть сделан на основе количественного определения ожидаемых изменений температуры и влажности воздуха при разных метеорологических условиях.

Радиационные туманы образуются, как правило, при небольшом ветре, который имеет место в ночное время, поэтому для прогноза таких туманов необходимо определить изменения температуры и влажности воздуха в ночное время.

Борьба с туманами

В зависимости от причин появления туманов и масштабов их развития способы ликвидации туманов разные. При туманах большого масштаба целесообразно предупредить их попадание в карьерное пространство путем проведения мероприятий на наветренной стороне карьера, при этом обязательно должна учитываться скорость ветра. Желательно, чтобы выпадение ядер кристаллизации влаги, которые составляют туманное облако, происходило раньше времени, к подходу облака в карьерное пространство. В случае образования тумана только в границах объема карьера в результате уменьшения температуры воздуха ниже границы насыщения, рекомендуется распыление тонкодисперсных веществ для содействия развития ядер конденсации (переохлажденных капель воды, кристалликов льда, твердую углекислоту, дым серебра, йодистый свинец, гигроскопические вещества, например, хлористый кальций). Наряду с этим, эффективной мерой может быть подогрев воздуха с целью повышения его температуры выше точки росы. Положительные результаты дает распыление горячей воды в атмосфере карьера.

4.2.3. Кондиционирование воздуха в карьерах

Кондиционирование воздуха имеет своей целью создание благоприятных условий труда и производственного быта, нормализацию выполнения технологических процессов, сохранение продукции и сооружений.

Установки для кондиционирования воздуха выполняют следующие основные функции:

– очистку воздуха от пыли;

– нагревание или его охлаждение;

– снижение концентрации вредных примесей до допустимых норм.

Кроме основных функций установки для кондиционирования могут выполнять и дополнительные функции: ионизацию воздуха, ликвидацию неприятных запахов или предоставление воздуху специальных запахов и др.

К системе кондиционирования рудничного воздуха относят комплекс технических мероприятий, как с применением холодильных машин, так и без них.

Кондиционирование без холодильных машин

К способам кондиционирования без холодильных машин относятся:

1) использование тепловыравнивающих каналов или выработок;
2) применение сжиженного воздуха;
3) применение сжатого воздуха;
4) охлаждение воздуха льдом;
5) охлаждение воздуха холодной водой артезианских колодцев, талой водой ледников и горных рек;
6) применение воды, охлажденной ранее в градирне;
7) душирование рабочих мест с помощью аэраторов.

Применение тепловыравнивающих каналов (канадский способ).

При использовании указанных каналов карьер или устье ствола шахты соединяют двумя горизонтальными каналами, которые пройдены на глубине зоны постоянной температуры пород, например, на глубине 20...30 м для условий Донбасса и Кривбаса. Каждый канал соединяется с поверхностью двумя шурфами. В зимний сезон породный массив, который окружает тепловыравнивающие каналы, охлаждается внешним воздухом, который при этом частично нагревается и потом поступает дальше в шахту или карьер через указанные каналы. Движение воздуха через каналы в случае необходимости обеспечивается вентиляторами. Летом теплый воздух охлаждается при перемещении по каналам и также как и зимой, поступает дальше в горные выработки, но уже охлажденным (на 10ºС и более). Этот способ целесообразно использовать для шахт и карьеров сравнительно небольшой глубины и небольших расходах воздуха в районах с резко континентальным климатом.

Использование сжиженного воздуха (азота).

Из специального баллона сжиженный воздух подается по трубопроводу на рабочие места в испаритель, где он испаряется, отнимая тепло от вентиляционной струи. Недостатком способа является его дороговизна.

Применение сжатого воздуха.

Охлаждающий эффект от расширения сжатого воздуха может также использоваться в шахтах и карьерах для регулирования их теплового режима. Простой выпуск воздуха дорогой и малоэффективный, поэтому более целесообразным есть использование холода от выхлопа сжатого воздуха, отработанного в пневматических машинах.

Охлаждение воздуха льдом.

Этот способ можно осуществить двумя путями:

1) путем непосредственного контакта воздуха с поверхностью льда в специальных камерах;

2) путем охлаждения льдом воды с последующим ее применением в форсуночных или поверхностных охладителях воздуха.

Этот способ применяется в случае больших расходов воздуха, при этом он более экономичный. Кондиционирование воздуха с использованием льда оправдывает себя в том случае, если необходимо охлаждать воздух лишь на протяжении относительно короткого жаркого периода года.

Охлаждение воздуха с использованием холода артезианских колодцев, горных рек и талой воды ледников.

Охлаждение воздуха на глубоких горизонтах может проводиться с использованием холода артезианских колодцев, горных рек и талой воды ледников. Вода горных рек, например, на Кавказе, даже в самый жаркий период года имеет температуру на 5...7ºС ниже, чем температура воздуха.

Охлаждение воздуха с помощью воды, предварительно охлажденной в градирне.

Охлаждающее оборудование располагается на поверхности возле устья ствола или рядом с карьером. Система охлаждения состоит из вентилятора, воздухоохладителя, градирни и циркуляционного насоса. Охлажденную в градирне за счет атмосферного воздуха воду подают по трубопроводу в приемный бак, а потом в змеевики (закрытый теплообменник). Регулирование тепловых условий указанным способом наиболее эффективно в районах с повышенной температурой и низкой влажностью воздуха. Для охлаждения воды вместо градирни можно использовать бассейн с разбрызгивателями.

Кондиционирование воздуха с использованием холодильных машин.

Для кондиционирования воздуха с использованием холодильных машин могут использоваться парокомпрессионные и абсорбционные машины. Парокомпрессионная машина состоит из трех основных частей:

1) холодильного агрегата в виде замкнутой системы, в которую входят компрессор, конденсатор, испаритель и регулирующий вентиль;
2) охлаждающего оснащения конденсатора;
3) охладителя воздуха (теплообменника).

Получение холода основано на изменении агрегатного состояния хладагента (аммиака, углекислоты, фреона), который беспрерывно циркулирует внутри системы холодильного агрегата. В подземных холодильных установках в качестве хладагента используют фреон, как более безопасный в эксплуатации.

Принципиальная схема холодильной установки приведена на рис. 4.8.

Компрессор 1 всасывает пар хладагента и сжимает его в конденсаторе 2, где под влиянием охлаждения водой пар хладагента конденсируется до жидкого состояния. Далее при прохождении жидкого хладагента через регулирующий вентиль 3 его давление и температура снижаются, чему оказывает содействие всасывающее действие компрессора.

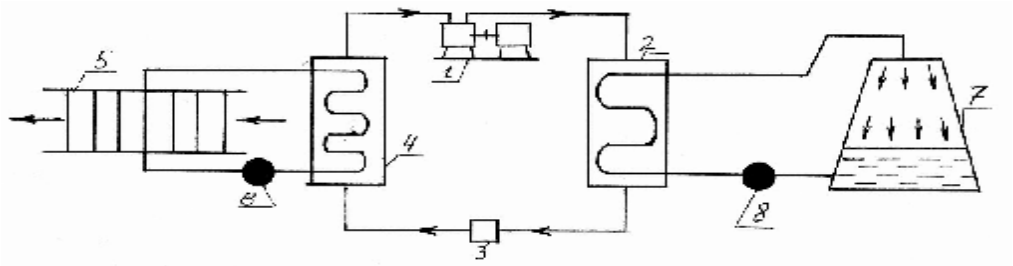


Рис. 4.8. Принципиальная схема парокомпрессионной установки: 1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – регулирующий вентиль; 4 – испаритель; 5 – система охлаждения воздуха; 6 – насос в системе охлаждения воздуха; 7 – градирня; 8 – насос для циркуляции охлажденной воды

В испарителе 4 хладагент снова испаряется, поглощая при этом тепло от холодильного теплоносителя, который циркулирует в системе охлаждения воздуха 5 с помощью насоса 6.

Пар хладагента снова всасывается компрессором, и цикл охлаждения повторяется. Охлажденный в испарителе 4 теплоноситель поступает по трубам в змеевики (или форсунки) охладителя воздуха 5, где отдает накопленный холод воздуху и снова возвращается в испаритель для повторного охлаждения. Холодильный теплоноситель представляет собой или чистую воду или водный раствор кухонной соли или хлористого кальция. Холодильное оборудование конденсатора состоит из градирни 7 (или бассейна с разбрызгивателями) и системы труб с насосом 8 для циркуляции охлажденной воды от градирни к конденсатору, а подогретой воды в обратном направлении.

Очень важной функцией холодильной установки является получение осушенного воздуха, который достигается снижением температуры ниже точки росы.

Подземные холодильные установки могут быть стационарными и передвижными. Передвижные установки размещают близ очистительных или подготовительных забоев. Тепло конденсации, как правило, выдается на вентиляционный горизонт в исходящую струю воздуха.

В абсорбционных машинах пар холодильного агента поглощается со следующей ее возгонкой. На этот процесс расходуется определенное количество внутреннего тепла преобразований хладагента. В абсорбционной машине вода из охладителя воздуха поступает в барабан, в котором расположены абсорбер и испаритель. В барабане распыляется вода с добавками некоторых веществ, например, бромистого лития. Вследствие значительной разности в упругости пара воды и бромистого лития возникает интенсивное выпаривание воды и ее охлаждение. Охлажденная вода собирается в поддоне и снова направляется в охладитель воздуха. При этом водяной пар поглощается бромистым литием, который непрерывно направляется к генератору, где осуществляется выпаривание воды.

Кондиционирование воздуха в кабинах и кузовах горно-шахтного оборудования

В кабинах и кузовах горно-шахтного оборудования возникает необходи-

мость кондиционирования воздуха для создания наиболее благоприятного для персонала микроклимата. Кондиционерные установки очищают воздух от пыли и некоторых вредных газов. Эти установки обеспечивают одновременно оптимальные температуру, влажность и скорость движения воздуха. Летом температура в кабинах машин, как правило, превышает внешнюю температуру. Главным источником тепла является солнечная радиация. Теплоприток в кабину происходит также от тела работников-машинистов экскаваторов, буровых станков, водителей автосамосвалов и т.п. Зимой, наоборот, происходит отток тепла из кабины наружу.

Теплопритоки в кабину летом можно уменьшить путем теплоизоляции поверхностей оборудования, которое нагревается в процессе работы, экранирования тех поверхностей, которые нагреваются солнечной радиацией, а также через остекление.

Оптимальными параметрами воздуха в холодный период года (если внешняя температура ниже чем – 10ºС) являются: температура 18...20^{0}С, относительная влажность 40...60%, скорость движения воздуха не более 0,2 м/с; а в теплый период года (если внешняя температура +10ºС и выше) – соответственно 21...23ºС, 40...60%, не менее чем 0,3м/с.

Кроме очистки воздуха от пыли и вредных газов в теплый период года необходимо охлаждать воздух, который подается в кабину, а в отдельных случаях проводить его осушение. Зимой, наоборот, необходимо проводить увлажнение и подогрев воздуха.

Для очистки воздуха используют пылеуловители, на отдельных стадиях процесса – циклоны, мультициклоны, трубу Вентури совместно с циклоном; масляные, рукавные, кассетные тканевые, пенополиуретановые, бумажные фильтры и др. На последней стадии очистки могут применяться рамные рукавные фильтры. Рукавный фильтр более совершенный, он состоит из отдельных рукавов, через ткань которого загрязненный воздух очищается от пыли. Ткани в свою очередь обеспыливаются (регенерируются) путем встряхивания рукавов или путем обратной продувки рукавов. В рукавных фильтрах могут использоваться сукно, вельвет, хлопково-бумажная фланель, лавсан и прочие ткани. В сравнении с тканевыми или войлочными фильтрами наиболее дешевым (в 10...30 раз) является фильтровальный картон. Эффективность очистки воздуха в бумажных фильтрах зависит от числа слоев бумаги и может достигать 96...98%. Картон ПКВ имеет рабочую воздушную нагрузку 0,1 м^3/(м^2·с) и эффективность пылеулавливания 0,906...0,970.

В отдельных случаях воздух должен очищаться от вредных газов. Для этого используют активированный древесный уголь, который поглощает некоторые пары и газы двигателей внутреннего сгорания, радиоактивные частички и др. В расчетах принимают 1 кг угля на 20 м^3/ч воздуха. Оксид углерода может поглощаться с помощью гопкалитовых фильтров, которые состоят из 60% MnO_2 и 40% CuO. Для очистки воздуха от углекислого газа и сероводорода используют водный раствор этаноламинов.

Охлаждение воздуха в кабинах горного и транспортного оборудования может осуществляться с помощью фреоновых парокомпрессорных установок,

воздушных охлаждающих машин (с турбодетандером и вихревой трубкой), термоэлектрических батарей, испарительных охлаждающих установок.

Подогрев воздуха, который подается в кабины горных и транспортных машин может осуществляться в электрических отопительных установках, использующих тепло системы охлаждения или отработанных газов двигателей внутреннего сгорания, термоэлектрических и комбинированных подогревателей.

Для кондиционерных установок при небольшом их аэродинамическом сопротивлении используют низконапорные осевые или центробежные вентиляторы. При значительном сопротивлении применяют радиальные центробежные или диагональные вентиляторы. Для вентиляции кабин могут также применяться радиальные пылеотделяющие вентиляторы, ротационные пылеотделяющие, противоточные ротационные пылеотделяющие, осевые ротационные пылеотделяющие, которые, кроме нагнетания воздуха, позволяют осуществлять его очистку от пыли, как например, вентилятор-пылеотделитель ВПК-150.

Для экскаваторов ЭРГ-400, ЭКГ-4,6 разработан кондиционер с использованием рециркуляции воздуха. Домодедовский машиностроительный завод «Кондиционер» освоил выпуск кондиционеров КТА2-0,8Г-01 и КТА2 0,8Г-0,2 горизонтального исполнения. Для экскаваторов и другого оборудования Краматорский завод создал автономный кондиционер КТА2-0,59Э-0,1, который позволяет осуществлять вентиляцию, очистку воздуха от пыли и охлаждение воздуха в кабине машиниста.

В Национальном горном университете был разработан полупроводниковый терморадиационный кондиционер, в котором для снижения температуры воздуха в кабине используются специальные панели, которые охлаждаются термобатареями. ВНИИБТГ совместно со Стойленском ГОКом для кабин операторов роторно-конвейерного комплекса КИ-800 разработана фильтровентиляционная установка, в которой для охлаждения воздуха в летний период используется термоэлектрический воздухоохладитель 04М. ВНИИБТГ совместно с ВО «Новокраматорский машиностроительный завод» создали кондиционер для кабин операторов самоходного дробильного агрегата ДПА 2000/1200.

На автомобилях-самосвалах БелАЗ-549, БелАЗ-7519 и других машинах Белорусского автомобильного завода кабина имеет цельнометаллическую сварную конструкцию с термоизоляцией и мягкой внутренней обивкой. Для подогрева воздуха, поступающего в кабину с помощью двух вентиляторов, используется водный радиатор, который подогревается жидкостью системы охлаждение двигателя автомобиля. НИИБТГ для автосамосвалов БелАЗ-540, БелАЗ-548 разработал установку, которая предусматривает подачу в кабину очищенного от пыли, подогретого зимой или предварительно охлажденного летом воздуха.

Вопросы для самоконтроля

1. Температура и влажность воздуха.
2. Тепловой режим шахт.
3. Микроклимат на горных предприятиях.

4. Нормализация микроклимата шахт.
5. Кондиционирование воздуха.
6. Источники тепла в карьере.
7. Расчет количества тепла от инсоляции в карьере.
8. Температура воздуха в карьере.
9. Температурные условия на открытых площадках карьера.
10. Образование туманов в карьерах.
11. Борьба с туманами.
12. Общие сведения о кондиционировании воздуха.
13. Кондиционирование без холодильных машин.
14. Кондиционирование воздуха с использованием холодильных машин.
15. Кондиционирование воздуха в кабинах и кузовах горно-шахтного оборудования.

РАЗДЕЛ 5. РУДНИЧНАЯ АЭРОМЕХАНИКА

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в пятом разделе пособия:

– определять основные физические характеристики воздуха;

– осуществлять взаимный перевод единиц измерения между системами СИ и МКГСС;

– вычислять аэростатическое давление воздуха при изменении высотных отметок;

– определять условия равновесия находящегося в воздухе тела;

– рассчитывать скорость движения и давление воздуха в недоступных для измерения местах горных выработок;

– описывать движение воздуха по горным выработкам с помощью уравнения Бернулли;

– изображать схемы различных типов свободных струй;

– охарактеризовать основные элементы свободных струй;

– осуществлять построение графика изменения скорости свободной струи;

– определять изменение скорости воздуха вдоль оси затопленной струи;

– производить инженерные расчеты свободных струй.

5.1. Основные физические характеристики воздуха

Плотность (ρ) – масса единицы объема

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{g \cdot V} = \frac{\gamma}{g}, \text{ кг/м}^3.$$

Для иных условий

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T},$$

где $\rho_0 = 1{,}2$ кг/м^3 – плотность воздуха при нормальных условиях.

Удельный вес воздуха (γ) – вес единицы объема воздуха, т.е. отношение веса (силы тяжести) воздуха к его объему

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g,$$

где V – выделенный объём воздуха, м^3; G – вес выделенного объёма воздуха, Н; m – масса выделенного объёма воздуха, кг; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Размерность: в системе СИ – Н/м^3.

При нормальных условиях (p = 101,3 кПа, t = 20ºС, φ = 50%)

$$\gamma_0 = 11{,}8 \text{ Н/м}^3.$$

Для иных условий

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \frac{p}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T},$$

где p – барометрическое давление, Па; T – абсолютная температура, K.

Вязкость – свойство воздуха оказывать сопротивление касательным усилиям (скольжения или сдвигу), возникающими между слоями воздуха, перемещающихся параллельно друг другу с разными скоростями.

Динамическая вязкость μ (коэффициент внутреннего трения) – это сила трения между двумя слоями воздуха, отнесенная к единице площади при градиенте скорости, равном единице.

Размерность в системе СИ: Па·с. Динамическая вязкость воздуха $\mu = 18{,}2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

В аэродинамике обычно пользуются *кинематической вязкостью*, которая характеризует ускорения частиц воздуха, вызванные силами вязкости, и определяется как отношение динамической вязкости к плотности воздуха

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

При стандартных условиях кинематическая вязкость воздуха равна $\nu = 14{,}41 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Удельная массовая теплоемкость (c) – количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг воздуха на 1К (1ºС). Единицы измерения в СИ – $1\frac{Дж}{кг \cdot К}$. Внесистемная единица измерения – $1\frac{ккал}{кг \cdot °C}$.

Различают удельную теплоемкость при постоянном давлении и удельную теплоемкость при постоянном объеме соответственно

c_p = 0,239 ккал/кг·ºC = 1000 Дж/(кг·градус);

c_v = 0,17 ккал/кг·ºC = 712 Дж/(кг·градус).

Давление (p) – нормальная сила, действующая на единицу площади. В общем случае давление пропорционально плотности воздуха ($p \cdot V$ = const, p = const/V ~ ρ).

Давление движущегося по горным выработкам воздуха обусловлено аэростатическим давлением и работой вентилятора.

Единицы измерения давления в системе СИ: 1 Па. Нормальное атмосферное давление равно $p = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па = 0,1 МПа.

Внесистемные единицы измерения атмосферного давления:

1 бар = $1 \cdot 10^5$ Па = 760 мм. рт. ст. = 10^4 мм. вод. ст.

Из последнего соотношения можно сделать следующий вывод

10 Па = 1 мм.вод.ст.,

что широко используется при организации вентиляции шахт.

Депрессия (h) – разность давлений в двух точках потока, измеряется в тех же единицах, что и давление.

5.2. Основные законы аэростатики

Аэростатика – наука о равновесии воздуха. Она исследует условия, при которых воздух может находиться в неподвижном состоянии.

Одной из основных задач аэростатики является определение изменения давления с высотой (глубиной).

Давление, с которым имеют дело в аэростатике, называют *аэростатическое давление*. Оно обусловлено весом вышележащих слоев воздуха.

Основное уравнение аэростатики (уравнение равновесия) в проекциях на координатные оси имеет вид

$$dp = \rho \cdot \left(X \cdot dx + Y \cdot dy + Z \cdot dz\right), \qquad (5.1)$$

где p – давление; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; X, Y, Z – проекции объемной (массовой) силы, отнесенной к единице массы; x, y, z – координаты.

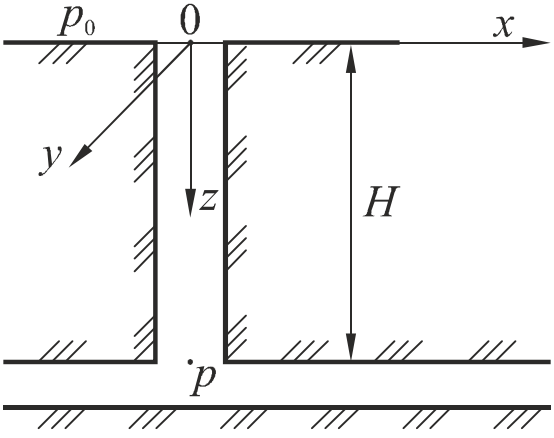
При неподвижной атмосфере единственной объемной силой является сила тяжести. Если ось 0z направлена вертикально вниз, то X = Y = 0, Z = g. В этом случае уравнение (5.1) принимает вид:

$$dp = \rho \cdot g \cdot dz = \gamma \cdot dz\,. \qquad (5.2)$$

Изменение γ с глубиной можно описать одним из следующих процессов:

- изохорическим ($V = const$);
- изотермическим ($T = const$);
- адиабатическим (процесс происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами т.е. $\Delta Q = 0$)
- политропическим (теплоемкость остается постоянной, т.е. c = const).

При изохорическом процессе после интегрирования уравнения (5.2) при граничных условиях $z = 0$, $z = H$, $p = p_0$ (рис. 5.1) получим



$$\int_{p_0}^{p} dp = \gamma_0 \int_0^H dz$$

$$p - p_0 = \gamma_0 H$$

$$p = p_0 + \gamma_0 H \qquad (5.3)$$

Рис. 5.1. Расчётная схема изменения атмосферного давления с ростом глубины

Имеются формулы для расчета давления на глубине для изотермического, адиабатического и политропического процессов. Эти формулы называются барометрическими.

Из выражения (5.3) следует, что приращение давления не зависит от площади поперечного сечения столба воздуха.

Законы давления (согласно Паскалю)

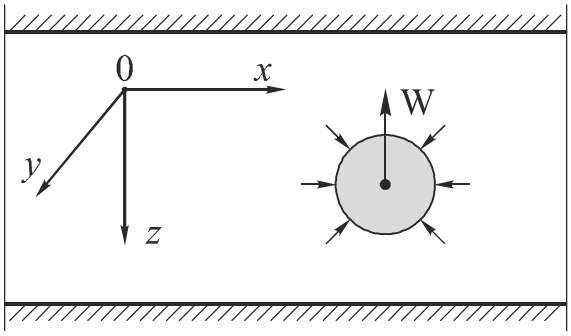
В неподвижном воздухе давление подчиняется следующим правилам:

– давление одинаково во всех точках, которые находятся на одном и том же уровне;
– давление на любую поверхность направлено перпендикулярно к ней;
– в любой точке воздушной среды давление одинаково во всех направлениях;
– давление, не вызывающее заметных эффектов сжатия воздуха, передается из одного места в другое без потерь.

Согласно этому закону уменьшение давления на поверхности, например на 10 мм рт. ст., вызывает уменьшение давления во всех выработках шахты на такую же величину.

Закон Архимеда

Согласно закону Архимеда на находящееся в воздухе тело действует вытесняющая сила W, направленная вертикально вверх и численно равная весу воздуха, вытесненного телом (рис. 5.2.)



$$p = -\gamma \cdot V ,$$

где V – объем тела; γ – средний удельный вес на уровне положения тела.

Рис. 5.2. Распределение сил, действующих на тело, в воздушной среде согласно закону Архимеда

5.3. Основные законы движения воздуха в горных выработках

5.3.1. Закон сохранения массы. Уравнение неразрывности движения

Масса любого объема воздуха, состоящая из одних и тех же частиц, во время движения остается постоянной

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = 0 ,$$

где m – масса воздуха в выделенном объеме V, кг; ρ – средняя плотность воздуха, кг/м^3; t – время, с.

При этом

$$m_{12} = m_{1\acute{1}} + m_{\acute{1}2};$$
$$m_{\acute{1}\acute{2}} = m_{\acute{1}2} + m_{2\acute{2}};$$
$$\Delta m = m_{2\acute{2}} - m_{1\acute{1}}.$$

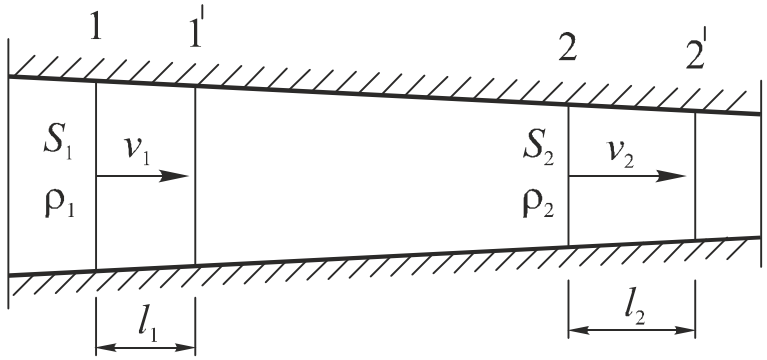


Рис. 5.3. Расчетная схема к закону о сохранении массы: S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения выработки в плоскости 1 и 2; v_1, v_2 – скорость движения воздуха в сечениях 1, 2; l_1, l_2 – перемещение сечений 1 и 2 за время dt

При перемещении объема 1-2 в новое положение $1'-2'$ масса объема $1'$-2 для стационарного движения, при котором характеристики потока (ρ, v) не изменяются, остается постоянной. Следовательно, изменение массы происходит от добавления объема 2-$2'$ и от вычитания объема 1-$1'$.

$$dm = d\left(\rho_2 \cdot S_2 \cdot l_2 - \rho_1 \cdot S_1 \cdot l_1\right) = 0$$

Так как $\frac{dm}{dt} = 0$, то

$$\rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 - \rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 = 0$$

или

$$\frac{\rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1}{\gamma_2 \cdot v_2 \cdot S_2 = \gamma_1 \cdot v_1 \cdot S_1}.$$

При отсутствии притечек и утечек массовый расход воздуха есть величина постоянная для всех сечений горных выработок.

Если плотность воздуха не изменяется, т.е. $\rho_1 = \rho_2$, то

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \qquad \text{или} \qquad Q_1 = Q_2.$$

Таким образом, уравнение неразрывности движения воздуха в горной выработке формулируется следующим образом: объемный расход воздуха в выработке является величиной постоянной при отсутствии утечек воздуха или притока газов.

5.3.2. Закон сохранения энергии. Уравнение движения воздуха по горным выработкам (уравнение Бернулли)

Закон сохранения энергии

Для случая движения воздуха закон сохранения энергии формулируется следующим образом: изменение энергии выделенного объема воздуха за некоторый промежуток времени равно сумме сообщенной ему тепловой энергии и работы внешних сил, приложенных к объему, за то же время

$$\Delta E_{вн} + \Delta E_п + \Delta E_к = I \cdot \Delta Q + \Delta A, \qquad (5.4)$$

где $\Delta E_{вн}$ – изменение внутренней энергии рассматриваемого объема воздуха; $\Delta E_п$ – изменение потенциальной энергии; $\Delta E_к$ – изменение кинетической энергии; I – механический эквивалент теплоты; ΔQ – количество тепла, полученное (отданное) данным объемом; ΔA – работа внешних сил.

В случае адиабатического движения несжимаемой жидкости ($\Delta Q = 0$, $\Delta E_{вн} = 0$, которой можно считать воздух при существующих в шахтах давлениях, уравнение (5.4) можно записать в виде:

$$\Delta E_п + \Delta E_к = \Delta A \qquad (5.5)$$

Уравнение Бернулли для идеального газа

Рассмотрим вначале движение потока идеального газа, в котором отсутствует сила трения, и установим для него уравнение, которое связывает между собой давление и скорость движения.

Выделим в потоке элементарную струйку воздуха (рис. 5.4), заключенную между сечениями 1 и 2, которая перемещается за время *dt* в положение 1' и 2'.

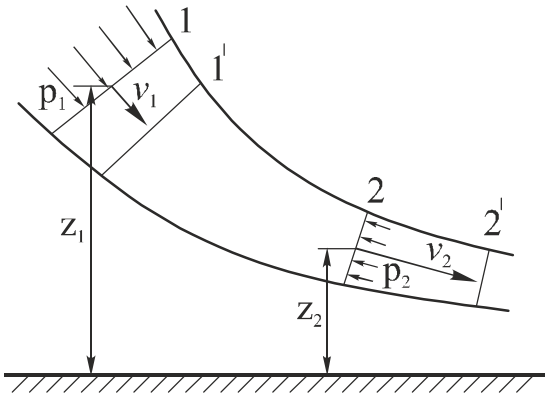


Рис. 5.4. Параметры элементарной струйки воздуха в движущемся потоке: для сечений 1 и 2 соответственно S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения струи; p_1 и p_2 – давление; v_1 и v_2 – скорость движения воздуха; z_1 и z_2 – высота относительно принятой плоскости сравнения

Элементарная струйка – это участок потока воздуха, ограниченный с боков линиями тока, проходящими через контур сечения. Вектор скорости движения воздуха при этом направлен по касательной к линиям тока. Контур сечения выбран очень малым, чтобы во всех его точках скорость движения воздуха была постоянна.

При установившемся движении изменение энергии и скорости в объеме 1'-2 равно нулю.

Следовательно, задача сводится к определению изменения энергии при перемещении массы воздуха *m,* заключенной в объеме, из положения 1-1' в положение 2-2' под действием внешних сил p_1 и p_2.

Потенциальная энергия объема 1-1' равна $m \cdot g \cdot z_1$. Кинетическая энергия объема 1-1' равна $\frac{m \cdot v_1^2}{2}$. Потенциальная энергия объема 2-2' равна $m \cdot g \cdot z_2$. Кинетическая энергия объема 2-2' равна $\frac{m v_2^2}{2}$.

Работа сил давления в сечении 1 - $p_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt$ ($v_1 dt$ – перемещение). Рабо-

та сил давления в сечении 2 – $p_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt$.

Работа нормальных сил, приложенных к боковым поверхностям элементарной струйки, равна 0, так как эти силы перпендикулярны к направлению перемещения частиц.

Согласно закону сохранения энергии запишем

$$m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{m}{2} \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right) = p_1 \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot dt - p_2 \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot dt .$$

Согласно уравнению неразрывности движения (сохранения массы)

$$S_1 v_1 dt = S_2 v_2 dt = V = \frac{mg}{\gamma} .$$

Разделив все члены на $V = \frac{mg}{\gamma}$ и сгруппировав все члены с однородными индексами, получим уравнение Бернулли для идеальных жидкостей и газов (сформулировано в 1738 году)

$$p_1 + \frac{v_1^2}{2g}\gamma + \gamma z_1 = p_2 + \frac{v_2^2}{2g}\gamma + \gamma z_2 = const . \qquad (5.6)$$

Все составляющие этого уравнения имеют размерность давления.

Давление p обычно называют статическим давлением. Это давление действует в потоке во всех направлениях, включая боковые стенки воздуховодов.

Давление $\frac{v^2}{2g}\gamma$ называют динамическим или скоростным давлением. Оно характеризует кинетическую энергию единицы объема воздуха. Это давление отражает потенциальную прибавку статического давления, если поток воздуха остановить. Скоростное давление действует на поверхности, расположенные поперек потока.

Давление γz называется «весовым» давлением. Оно характеризует энергию положения единицы объема воздуха, которая не аккумулируется в потоке.

Таким образом, из уравнения Бернулли следует, что при установившемся движении идеальной несжимаемой жидкости сумма статического, динамического и весового давлений есть величина постоянная во всех сечениях одной и той же струйки.

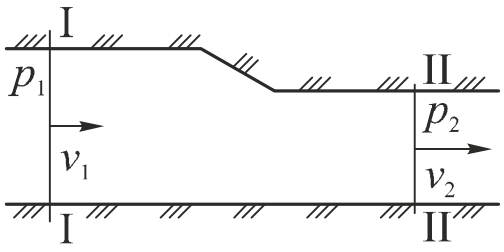
С энергетической точки зрения каждый член уравнения Бернулли выражает одну из форм энергии (кинетической или потенциальной), которой обладает единица объема (массы) газа.

Из уравнения Бернулли следует, что для любого сечения струйки жидкости

$$p + \frac{v^2}{2g}\gamma + \gamma z = const .$$

При движении воздуха по стволу вниз с постоянной скоростью, уменьшение весового давления γz приводит к росту статического давления.

В случае горизонтального движения ($z = const$) (рис. 5.5) уравнение Бернулли имеет вид



$$p + \frac{v^2}{2g}\gamma = const$$

Рис. 5.5. Схема движения воздуха в горизонтальной выработке переменного сечения

Важным следствием из уравнения Бернулли является тот факт, что увеличение скорости движения воздуха приводит к уменьшению статического давления и наоборот, уменьшение скорости движения воздуха, при расширении горных выработок, сопровождается увеличением статического давления.

С точки зрения механики это объясняется следующим образом: переходя от широкого сечения к узкому, частицы воздуха испытывают ускорение, направленное вдоль потока, и, следовательно, согласно второму закону Ньютона, давление в первом сечении должно быть больше, чем во втором. Таким образом, принцип Бернулли «где быстрее течение, там меньше давление» иллюстрирует фундаментальный закон физики к движению жидкости и газов.

Уравнение Бернулли для реальных газов

В реальных жидкостях и газах, вследствие наличия вязкости, наблюдается неравномерность распределения скоростей по сечению и потерь энергии. При движении реальных газов вдоль твердых стенок поток замедляется под действием сил вязкости и молекулярного притяжения. В результате наибольшие скорости наблюдаются в центральной части потока. По мере приближения к стенке скорость потока уменьшается почти до нуля.

Неравномерность распределения скоростей обуславливает скольжение слоев газа, что приводит, в конечном счете, к возникновению сил внутреннего трения.

Кроме того, при движении реального газа наблюдается перемешивание между слоями, на что расходуется энергия. Поэтому полное давление потока реального газа не остается постоянным.

Вследствие неравномерности распределения скоростей при рассмотрении движения воздуха целесообразно оперировать средней скоростью потока и средним значением полного давления в заданном сечении.

Рассмотрим энергию переносимую воздушным потоком через произвольное сечение горной выработки в единицу времени. Для элементарной струйки можем записать

$$dN = p_n \cdot dQ = \left(p + \gamma \cdot z + \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \right) \cdot v \cdot dS ,$$

где dN – энергия, переносимая потоком элементарной струйки в единицу времени (мощность потока); p_n – полное давление в сечении элементарной струйки; dQ – расход воздуха через сечение элементарной струйки; dS – сечение элементарной струйки;

Для всего потока в заданном сечении

$$N = \int_S \left(p + \gamma \cdot z + \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \right) \cdot v \cdot dS = \left(p + \gamma \cdot z \right) \cdot \int_S v \cdot dS + \frac{\gamma}{2g} \cdot \int_S v^3 \cdot dS ,$$

но

$$\int_S v \cdot dS = Q = v_{cp} \cdot S ,$$

где Q – расход воздуха в сечении S потока; $v_{ср}$ – средняя скорость потока.

Тогда средняя удельная энергия (среднее значение полного давления в заданном поперечном сечении) составит

$$p_{n.cp} = \frac{N}{Q} = p + \gamma \cdot z + \frac{\gamma}{2 \cdot g \cdot Q} \cdot \int_S v^3 \cdot dS .$$

Учитывая, что $Q = v_{cp} \cdot S$, после умножения и деления последнего члена уравнения на v_{cp}^2 получим

$$p_{n.cp} = p + \gamma \cdot z + \frac{\int_S v^3 \cdot dS}{v_{cp}^3 \cdot S} \cdot \frac{v_{cp}^2}{2g} \cdot \gamma = p + \gamma \cdot z + K \cdot \frac{v_{cp}^2}{2g} \cdot \gamma ,$$

где $K = \frac{\int_S v^3 \cdot dS}{v_{cp}^3 \cdot S}$ безразмерный коэффициент кинетической энергии, который учитывает неравномерность распределения скоростей в сечении.

Коэффициент K всегда выше единицы.

С учетом полученного выражения для среднего значения полного давления в заданном сечении и потерь давления при движении потока, уравнение Бернулли для реального газа можно записать в виде

$$p_1 + \gamma_1 \cdot z_1 + K_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \cdot \gamma_1 = p_2 + \gamma_2 \cdot z_2 + K_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \cdot \gamma_2 + h$$

или

$$\left(p_1 - p_2 \right) + \left(\gamma_1 \cdot z_1 - \gamma_2 \cdot z_2 \right) + \left(K_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \cdot \gamma_1 - K_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \cdot \gamma_2 \right) = h .$$

где $p_1 - p_2 = h_в$ – разность статических давлений в сечениях 1 и 2 (является следствием работы вентилятора); $\gamma_1 \cdot z_1 - \gamma_2 \cdot z_2 = h_е$ – разность давлений двух столбов воздуха, имеющих высоту z_1 и z_2 и удельный вес γ_1 и γ_2 (эта разность называется депрессией естественной тяги); $K_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \cdot \gamma_1 - K_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \cdot \gamma_2 = h_{дин}$ – разность динамических давлений в сечения 1 и 2; v_1 и v_2 – средняя скорость движения в сечениях; h – потери давления на преодоление сопротивлений движения.

С учетом принятых обозначений можно записать

$$h_в + h_е + h_{дин.} = h .$$

В этом уравнении величины h_e и $h_{дин.}$ могут быть со знаком «+» и «–».

Если уравнение Бернулли для идеальной жидкости устанавливает принцип сохранения энергии, то для реальной жидкости и газа это уравнение выражает баланс энергии с учетом ее потерь.

Закон сохранения энергии при движении воздуха по горным выработкам (уравнение Бернулли для реальных газов) можно сформулировать так: при установившемся адиабатическом движении воздуха по выработкам энергия единицы объема воздуха, поступающая в поток, полностью расходуется на преодоление всех сопротивлений на пути движения воздуха.

5.4. Свободные турбулентные струи

Понятие о свободной струе

На рис. 5.6 (*а*) показана свободная струя в карьере. Ветровой поток воздуха срывается в точке *A* с твердой границы (земной поверхности) и, расширяясь, движется в карьерном пространстве в виде свободной струи *BAC*. Поверхности *AB и AC* являются границами струи, по которым воздух движется со скоростью, равной скорости воздуха вне струи (ниже границы *AC* воздух считается неподвижным, выше *AB* – движется со скоростью ветра $u_в$).

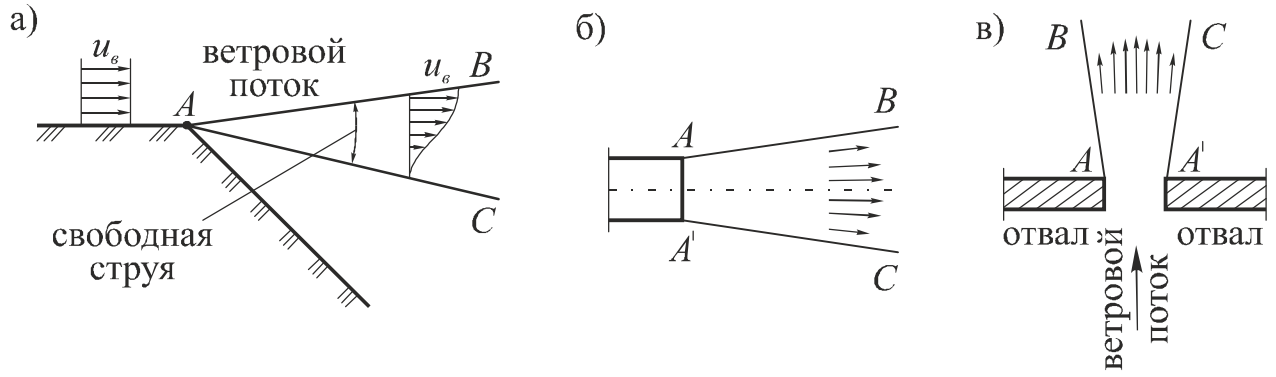


Рис. 5.6. Схемы свободных струй

На рис. 5.6 (б) показана свободная струя *BAA'C,* образующаяся при выходе воздушного потока из трубопровода, а на рис. 5.6 (в) – при выходе ветрового потока между двумя отвалами породы (вид в плане).

Типы свободных струй

Свободные струи бывают полными и неполными. *Полная струя* не соприкасается с твердой границей. *Неполная струя* с одной стороны соприкасается с твердой границей, с другой – с заполненным воздухом пространством. Например, на рис. 5.7 (*а*) неполная свободная струя *BACД* на участке *СД* имеет твердую границу.

Разновидностью неполной струи является полуограниченная струя, одной стороной движущаяся вдоль твердой границы по всей своей длине, начиная от начального сечения. Такая струя может образовываться при выходе воздуха из трубопровода, проложенного по земле (рис. 5.7, *б*).

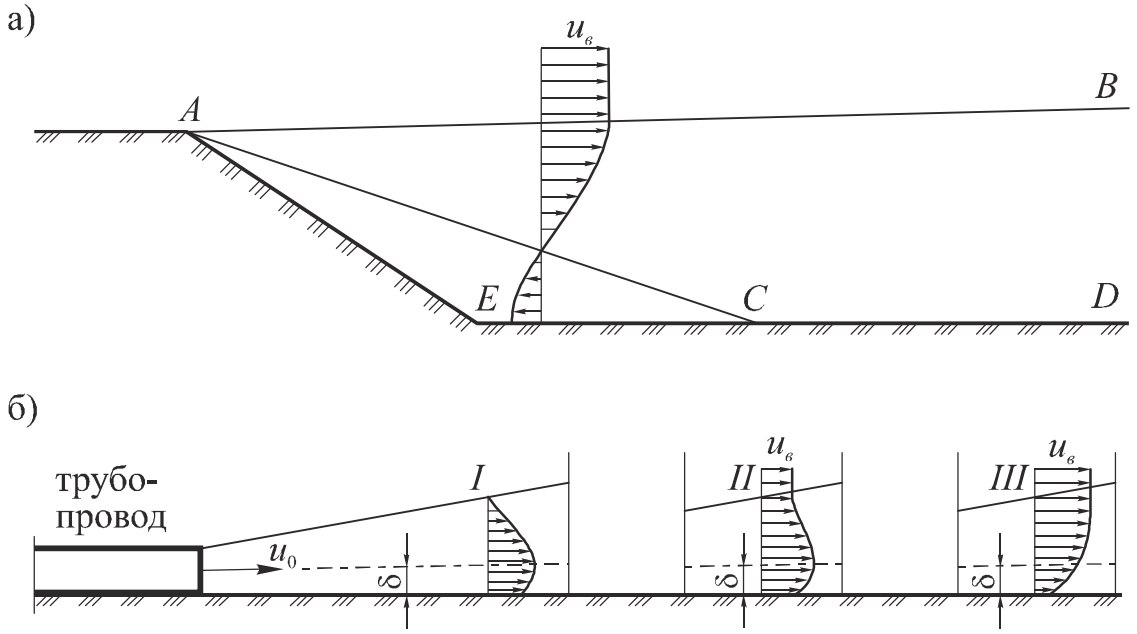


Рис. 5.7. Схемы неполных свободных струй: *I*, *II*, *III* – поперечные сечения струи

В зависимости от формы выходного отверстия свободные струи могут иметь различную форму. Наиболее изучены круглые, осесимметричные (рис. 5.8, *а*) и плоские или плоско-параллельные (рис. 5.6, *а* – участок струи *AC* и рис. 5.8, *б*) струи.

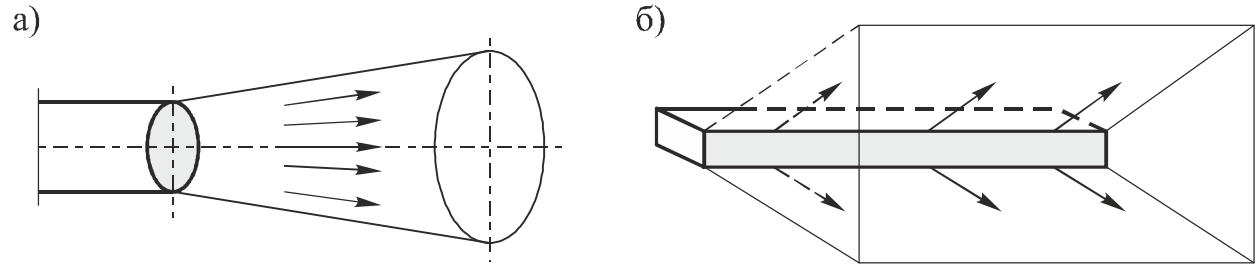


Рис. 5.8. Схемы круглой и плоской свободных струй

Причины образования и основные элементы свободных струй. Основными причинами образования свободных струй являются инерция движущегося воздуха и изменение направления твердых границ потока. При резком изменении формы твердой границы (например, в точке *A* на рис. 5.7, *а*) поток воздуха под действием сил инерции преодолевает сцепление с твердой поверхностью, отрывается от нее и распространяется в окружающем воздухе в виде свободной струи.

Вследствие трения об окружающие слои воздуха в струе происходит изменение скоростей: на границе струи скорость равна скорости окружающего воздуха, в струе она может увеличиваться или уменьшаться. Если струя распространяется в неподвижном воздухе (затопленная струя), то продольная составляющая скорости на ее границе равна нулю, а на оси скорость имеет максимальное значение. На рис. 5.9 показано изменение скоростей в затопленной

струе. В месте срыва струи с твердой границы (в сечении *O′O″*, называемом начальным) образуется пограничный слой, состоящий из увлеченных частиц внешней среды и заторможенных частиц струи.

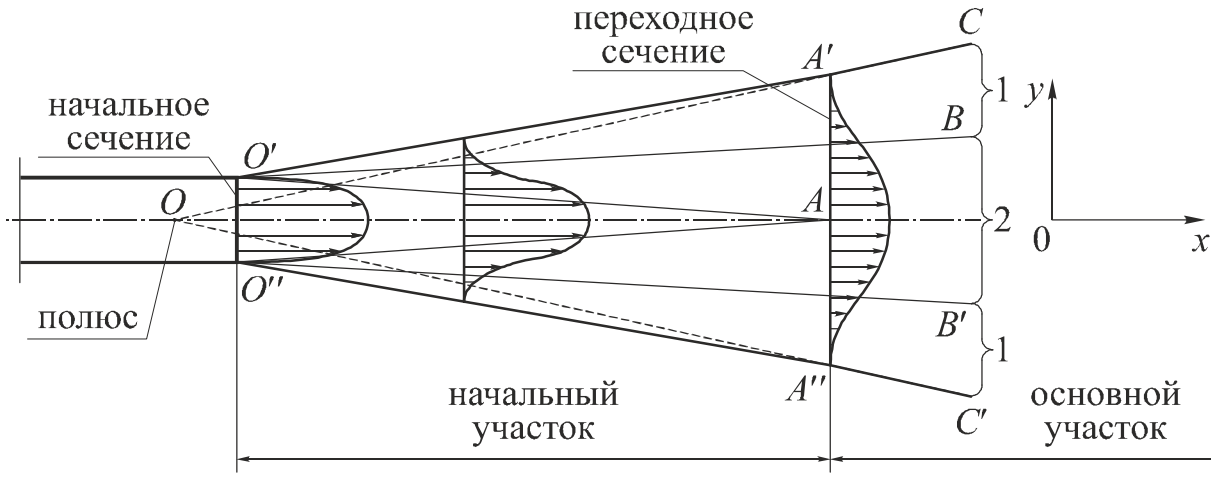


Рис. 5.9. Схема затопленной струи: 1 – присоединенные массы; 2 – ядро постоянной массы.

Процесс увлечения и торможения частиц продолжается вдоль по струе, вследствие чего пограничный слой расширяется и в сечении *A′AA″* происходит смыкание пограничных слоев *AO′A′* и *AO″A″*. Участок от начального сечения *O′O″* до сечения *A′A″* называется начальным. На нем происходит полное развитие пограничного слоя и формирование основного профиля скоростей свободной струи. Поэтому сечение *A′A″* называется переходным. Основной участок струи (см. рис. 5.9) состоит из сплошного пограничного слоя; профили продольной скорости на нем подобны профилю в сечении *A′A″*. В зоне *O′AO″* начального участка скорости такие же, как и в сечении *O′O″*. В действительности между начальным и основным участками находится переходной участок конечной длины. Однако часто им пренебрегают, принимая, что основной участок сразу следует за начальным.

В переходном сечении *A′A″* угол расширения струи несколько увеличивается. Точка *O* пересечения границ основного участка струи называется полюсом струи. Свободную струю на основном участке можно рассматривать как истекающую из ее полюса.

Вследствие увлечения частиц воздуха, в котором распространяется струя, ее масса увеличивается по мере удаления от начального сечения. Поэтому в струе можно выделить ядро постоянной массы, в котором масса движущегося воздуха равна массе воздуха в начальном сечении. Ядро постоянной массы (см. рис. 5.9.) находится в пределах зоны *BO′O″B′*. В зонах *CO′B* и *C′0″B′* располагаются массы воздуха, присоединенные к потоку из окружающей среды; эти зоны называются зонами присоединенных масс.

Режим движения воздуха в струе может быть ламинарным или турбулентным, однако при проветривании карьеров ламинарные струи не имеют практического значения. Поэтому ниже рассматриваются турбулентные сво-

бодные струи.

Свободные струи в неограниченном пространстве

Давление и скорости в струе. Особенностью свободных струй является равенство статических давлений в струе давлению во внешней среде. Для условий карьера давление во внешней среде на участке действия струи обычно постоянно, поэтому оно постоянно и во всей области движения свободной струи. Более точные исследования показывают, что давление на оси круглой струи несколько меньше, а на оси плоской струи – больше, чем в окружающей среде.

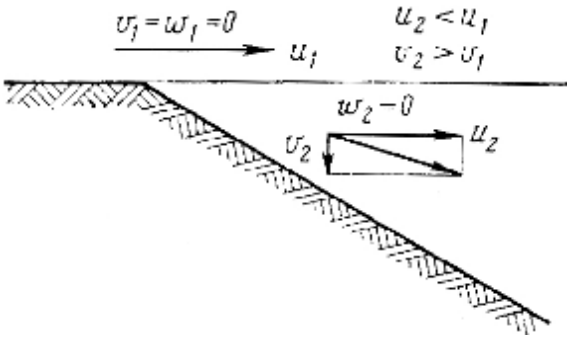


Рис. 5.10. Схема изменения скорости воздуха при расширении плоского потока ($w = 0$)

Поскольку свободная струя представляет собою расширяющийся поток, в нем существует продольная и поперечная составляющие скорости (рис. 5.10.).

Однако, как показывает опыт, в любом сечении струи поперечная составляющая скорости настолько мала по сравнению с продольной, что в инженерных расчетах ею можно пренебречь.

Характерной особенностью струи является подобие ее полей скоростей. По мере удаления от начального сечения струи скорости в ней уменьшаются (рис. 5.9).

Безразмерные профили скорости для основных и начальных участков круглых и плоских струй как затопленных, так и распространяющихся в попутных и встречных воздушных потоках, изображаются кривой, показанной на рис. 5.11 (u – скорость в точке с ординатой y, u_m – скорость на оси струи, y_c – ордината точки, где $u = 0{,}5 \cdot u_m$).

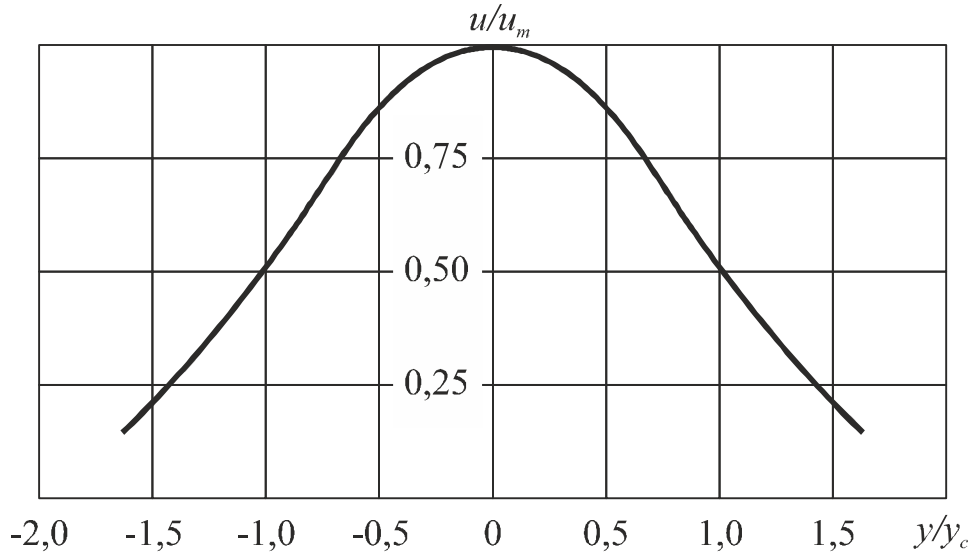


Рис. 5.11. Характер изменения скорости свободной струи

Изменение скорости вдоль оси затопленной струи описывается выражениями:

– для круглой струи

$$u_m = const \frac{u_0 r_0}{x'}, \tag{5.7}$$

– для плоской струи

$$u_m = const \frac{u_0 \sqrt{b_0}}{\sqrt{x'}}, \tag{5.8}.$$

где u_0 – скорость в начальном сечении струи; r_0 – радиус начального сечения струи; x' – расстояние от полюса струи; b_0 – полутолщина начального сечения струи.

Значения постоянных (*const*) в выражениях (5.7) и (5.8) зависят от вида струи (круглая или плоская), от начальных значений турбулентности и профиля скорости и определяются либо экспериментально, либо расчетным путем.

Формулы (5.7) и (5.8) совместно с универсальной кривой распределения скорости (рис. 5.11) позволяют определить абсолютную скорость в любой точке струи. Например, пусть требуется найти скорость u в точке плоской струи с координатами x', y. Начальная скорость u_0, половина толщины начального сечения b_0 и ордината y_c заданы. По графику (рис. 5.11) определяем отношение u/u_m, соответствующее нашему значению y/y_c. Пусть оно будет $u/u_m = c$. Тогда

$$u = cu_m,$$

или с учетом формулы (5.8)

$$u = c \cdot const \frac{u_0 \sqrt{b_0}}{\sqrt{x'}}. \tag{5.9}$$

При прочих равных условиях (одинаковые скорости в выходном сечении, одинаковая ширина выходных отверстий) скорость воздуха на одном и том же расстоянии от начального сечения у плоской струи больше, чем у круглой, т. е. дальнобойность плоской струи больше.

Турбулентность. Интенсивность турбулентности в свободной струе равна нулю на ее внешних границах и максимальная на оси струи.

Расширение струи. Граница свободной струи представляет собой поверхность, образующая которой – прямая линия. Угол образующей с осью струи является углом ее раскрытия α. Для основного участка струи он определяется из следующих выражений:

– для плоской струи

$$tg\alpha = 2{,}4 \cdot a$$

– для круглой струи

$$tg\alpha = 3{,}4 \cdot a, \tag{5.10}$$

где a – коэффициент структуры струи. Для плоской струи $a = 0{,}09\ldots0{,}12$, для круглой $a = 0{,}066\ldots0{,}076$.

Коэффициент a не зависит от числа Рейнольдса потока. Он возрастает с увеличением неравномерности профиля в начале струи и, особенно, с увеличением турбулизации струи и внешнего потока. Чем больше a, тем шире раскры-

вается струя и тем быстрее она затухает.

Формулы (5.10) справедливы для затопленной струи и струи во встречном потоке воздуха. Струя в попутном потоке имеет переменный угол раскрытия, уменьшающийся с увеличением скорости попутного потока.

Наблюдения показывают, что углы раскрытия свободных струй, образуемых ветровыми потоками при их срыве с верхних бровок бортов карьеров, изменяются от 2 до 25° в зависимости от турбулизации атмосферы.

Уравнение движения. Как отмечалось ранее, основной участок свободной струи представляет собой пограничный слой, образовавшийся в месте срыва струи воздуха с ее твердых границ, развившийся и сомкнувшийся после переходного сечения (рис. 5.9). Поэтому движение воздуха на основном участке свободной струи можно описать уравнениями движения пограничного слоя, которые получаются из общих уравнений движения с учетом, что протяженность течения в пограничном слое в поперечном направлении всегда незначительная по сравнению с протяженностью в продольном направлении, и что поперечный градиент скорости всегда максимальный. Если учесть также, что в свободной струе давление постоянно, то можно получить следующее уравнение движения в свободной струе

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau}{\partial y}. \qquad (5.11)$$

Уравнение неразрывности при этом

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0. \qquad (5.12)$$

В уравнениях (5.11) и (5.12): U и V – абсолютные значения составляющих скоростей соответственно по осям O_x и O_y, связанные с усредненными (u, v) и пульсационными ($u_п$, $v_п$) компонентами выражениями: $U=u+u_п$, $V=v+v_п$; τ – турбулентное касательное напряжение.

5.5. Инженерные расчеты свободных струй

При инженерных расчётах определяют такие параметры как угол раскрытия струи, среднюю скорость воздуха в сечении, количество воздуха, движущегося в струе и некоторые другие.

Расчет угла раскрытия производится по формулам (5.10).

Формулы для расчета остальных параметров струи приведены в табл. 5.1.

На рис. 5.12. показаны графики для определения $\varphi(a)$ и $\varphi'(б)$, где

$$A=\frac{0{,}833}{\sqrt{\frac{ax}{b_0}+0{,}41}};$$

$$B=\frac{0{,}52}{\frac{ax}{r_0}+0{,}29}.$$

Таблица 5.1

Значения параметров свободной турбулентной струи

Параметры	Формулы для расчета струи	
	плоской	круглой
Отношение средней по расходу скорости $u_{ср}$ в произвольном сечении основного участка струи к осевой скорости	$\frac{u_{ср}}{u_m} = 0{,}685$	$\frac{u_{ср}}{u_m} = 0{,}470$
То же, но для средней по площади скорости	$\frac{u'_{ср}}{u_m} = 0{,}410$	$\frac{u'_{ср}}{u_m} = 0{,}197$
Расход воздуха, протекающего в секунду в произвольном сечении основного участка струи	$Q = 1{,}2 \cdot Q_0 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot x}{b_0} + 0{,}41}$	$Q = 2{,}18 \cdot Q_0 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{r_0} + 0{,}29\right)$
Толщина b' (радиус r') ядра постоянной массы основного участка струи	$b' = \varphi \cdot b_0 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{b_0} + 0{,}41\right)$	$r' = \varphi' \cdot r_0 \cdot \left(\frac{a \cdot x}{r_0} + 0{,}29\right)$

Примечание: здесь Q_0 – расход воздуха, вытекающего из начального сечения; a – коэффициент структуры струи; x – расстояние от начального сечения струи; b_0, r_0 – полутолщина и радиус начального сечения; φ и φ' – безразмерные коэффициенты.

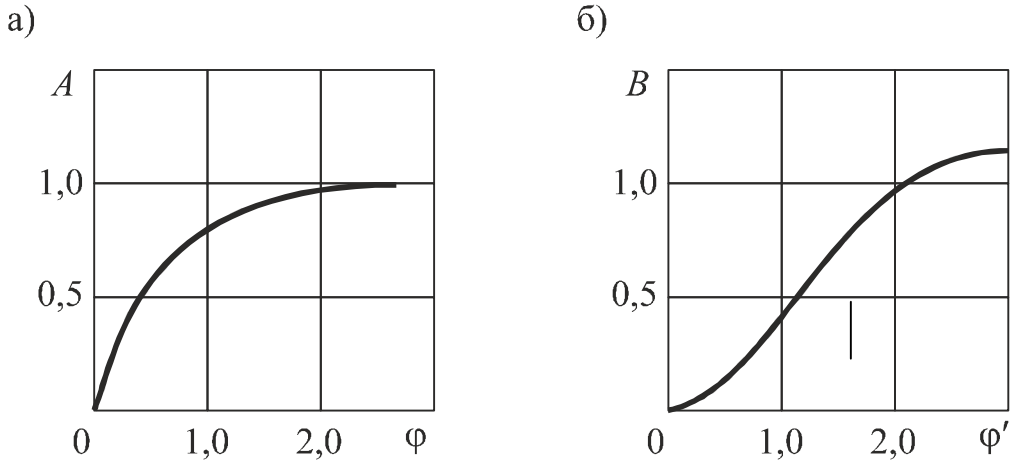


Рис. 5.12. Графики для определения половины толщины (радиуса) ядра постоянной массы свободной струи

Особые случаи воздушных струй

При вентиляции карьеров часто встречаются воздушные струи, законы движения которых в определенной степени отличны от изложенных выше.

Одними из наиболее распространенных струй в карьерах являются струи в ограниченном пространстве. На рис. 5.7 (*б*) показана схема полуограниченной

струи, распространяющейся вдоль поверхности земли. В сечении *I* показана эпюра скоростей затопленной струи (скорость ветра вне струи $u_в = 0$), в сечении *II* – при $u_в < u_0$, где u_0 – скорость на выходе из трубопровода, в сечении *III* – при $u_в > u_0$. Особенностью развития такого рода струй является тормозящее действие твердой поверхности, создающее в пределах общего пограничного слоя струи свой пограничный слой *б*, в котором скорость у твердой границы уменьшается до нуля.

Схема струи, распространяющейся в ограниченном пространстве *AEC* карьера, показана на рис. 5.7 (*а*). Особенностью здесь является наличие обратного потока в пространстве *AECA,* образующегося вследствие отсечения поверхностью *CD* от струи *BAC* присоединенных масс и их последующего поворота в обратном направлении. В объеме *AECA* характер движения воздуха такой же, как и в полуограниченной струе, если бы ее полюс находился в точке *C* (смотри эпюры скоростей в зоне *AEC* и на рис. 5.7 (*б*) сечение *I*). В связи с этим обратную полуограниченную струю, распространяющуюся в объеме *ACEA* (рис. 5.7, *а*) между прямой струей (см. рис. 5.7 (*а*), струя *BAC)* и твердой поверхностью *AEC,* называют струей второго рода, а точку *C* – источником второго рода.

При искусственной вентиляции карьера часто используют свободные струи, создаваемые авиационными винтами. Распространяясь в атмосфере карьера, они взаимодействуют с ветровым потоком и искривляются (рис. 5.13).

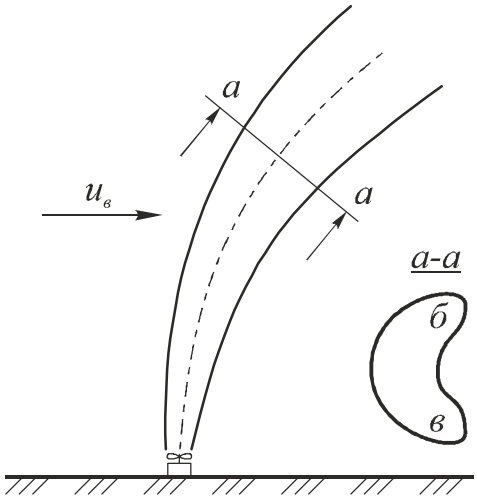


Рис. 5.13. Схема свободной струи в сносящем потоке

Степень искривления зависит от скорости ветра $u_в$ и скорости струи. Причиной искривления является повышение давления на наветренной стороне струи и образование разряжения на подветренной. Периферийные участки струи *б* и *в* (рис. 5.13, сечение *а – а*) сносятся сильнее, так как скорость воздуха в них меньше, чем в центральной части струи, и поперечное сечение струи приобретает подковообразный вид.

Иногда для вентиляции карьера используют подогретые (неизотермические) свободные струи, создаваемые реактивными авиационными и некоторыми другими установками. В этом случае вследствие разности плотностей воздуха в струе и вне ее появляется выталкивающая сила. Если такая струя направлена вверх, то выталкивающая сила увеличивает и скорость, если вниз –

уменьшает. Параметры вертикальных неизотермических струй зависят, кроме отмеченных ранее факторов, от избыточного (по сравнению с окружающим воздухом) количества тепла в начале струи, а наклонных неизотермических струй – также от их угла наклона к горизонту. В последнем случае подогретая струя будет изгибаться вверх.

Вопросы для самоконтроля

1. Основные физические характеристики воздуха.
2. Основные законы аэростатики.
3. Закон сохранения массы.
4. Уравнение неразрывности движения.
5. Закон сохранения энергии.
6. Уравнение движения воздуха по горным выработкам (уравнение Бернулли).
7. Свободные турбулентные струи (примеры).
8. Типы свободных струй.
9. Причины образования и основные элементы свободных струй.
10. Свободные струи в неограниченном пространстве.
11. Инженерные расчеты свободных струй.
12. Особые случаи воздушных струй.
13. Схема свободной струи в сносящем потоке.
14. Ограниченные потоки. Примеры.
15. Депрессия. Скорости воздушных потоков.

РАЗДЕЛ 6. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в шестом разделе пособия:

– определять режим движения воздуха;

– осуществлять построение профиля скоростей воздуха по сечению воздуховода;

– охарактеризовать виды сопротивления движению воздушного потока;

– определять факторы, влияющие на величину потерь давления на трение, местных и лобовых сопротивлениях;

– рассчитывать потери давления при движении воздуха по воздухопроводу;

– охарактеризовать показатели шероховатости стенок воздуховода;

– разрабатывать мероприятия по снижению потерь давления на трение, местных и лобовых сопротивлениях;

– определять участки местных сопротивлений в горных выработках и воздуховодах;

– рассчитывать величину эквивалентного отверстия шахты;

– производить построение аэродинамической характеристики воздуховода;

– выявлять силы, формирующие движение воздуха в карьере, и оценивать их влияние на состояние атмосферы.

6.1. Режимы движения воздуха в шахтах и закон сопротивления

Течение воздуха по любому каналу может быть ламинарным и турбулентным.

В ламинарном режиме перенос вещества обусловлен обменом молекул между слоями потока. При этом режиме движения воздуха имеют место малые скорости при параллельных траекториях частиц и отсутствие перемешивания воздуха между слоями. Давление и скорость воздуха в каждой точке потока не изменяется во времени, поэтому движение при ламинарном режиме называют *стационарным.*

При турбулентном режиме происходит обмен объёмов воздуха, параметры движения воздуха беспорядочно изменяются во времени и пространстве. При постоянной средней скорости потока наблюдается изменение во времени скорости движения в каждой точке (пульсирует), поэтому движение называют *квазистационарным.*

Режим движения определяется критерием Рейнольдса, значение которого определяется из выражения

$$\mathrm{Re} = \frac{u \cdot d_г}{\nu},$$

где u – скорость движения воздуха, м/с; ν – кинематическая вязкость воздуха,

м^2/с ($\nu = 14{,}41 \cdot 10^{-6}$ м^2/с), $d_г$ – гидравлический диаметр выработки, м

$$d_г = \frac{4S}{P},$$

S – сечение выработки, м^2; P – периметр выработки, м.

Ламинарный режим характеризуется небольшой скоростью (0,002-0,06м/с). При ламинарном режиме движения воздуха $Re \le 2300$ для гладких трубопроводов и $Re \le$ 1000-1500 для горных выработок, а закон сопротивления $h = R \cdot Q^n$ проявляется с показателем n = 1.

При переходном режиме 2 > n > 1.

При *турбулентном* режиме движения воздуха $Re >$ 2300 для гладких трубопроводов и $Re >$ 1000-1500 для горных выработок, а закон сопротивления $h = R \cdot Q^n$ проявляется с показателем n = 2.

В ограниченных потоках существует «эффект прилипания»: прилегающие к стенкам слои воздуха полностью затормаживаются, как бы прилипая к твердым границам. Вследствие этого усредненная скорость воздуха на твердых границах потока равна нулю. По мере удаления от твердых границ их тормозящее влияние на слои воздуха ослабляется, и скорость воздуха возрастает. Максимального значения она достигает в средней части потока (рис. 6.1). Линия максимальных скоростей называется аэродинамической осью потока. При турбулентном режиме движения профиль скорости более тупой, чем при ламинарном.

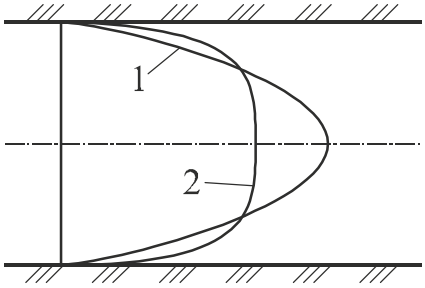


Рис. 6.1. Схема профилей усредненной скорости движения воздуха в потоке с твердыми границами:

1 – ламинарное движение;

2 – турбулентное движение

Пульсационная скорость в трубопроводах равна нулю на стенках, затем достигает максимального значения вблизи стенок и уменьшается к аэродинамической оси. У более шероховатых стенок (например, у кровли выработок) пульсационная скорость больше, чем у менее шероховатых (например, у почвы выработки).

Разность давлений, создаваемая источником тяги, теряется на преодоление сопротивлений горных выработок. Это сопротивление обусловлено силами внутреннего трения (вязкостью воздуха) и вихреобразованием при обтекании потоком элементов крепи, армировки и других препятствий, порождающих потери энергии.

Условно различают два вида потерь давления:

– потери, рассредоточенные по длине, обусловленные сопротивлением трения;
– локальные потери, обусловленные местными и лобовыми сопротивлениями.

6.2. Сопротивление трения

Потеря давления в выработках зависит от ее формы, размеров, шероховатости ее стенок и скорости движения воздуха. Опытным путем установлено, что потери на трение пропорциональны динамическому давлению.

В гидравлике и аэрологии для расчета потерь давления на трение используется эмпирическая формула Вейсбаха-Дарси

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \text{, Па} \qquad (6.1)$$

где λ – безразмерный коэффициент сопротивления; L – длина воздуховода, м; d – диаметр воздуховода, м; v – средняя скорость движения воздуха, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; γ – удельный вес, Н /м^3.

Выразив $d = \frac{4 \cdot S}{P}$ и $v = \frac{Q}{S}$, получим

$$h = \frac{\lambda \cdot \gamma \cdot P \cdot L \cdot Q^2}{4 \cdot S \cdot 2 \cdot g \cdot S^2} = \frac{\lambda \cdot \gamma}{8 \cdot g} \cdot \frac{P \cdot L \cdot Q^2}{S^3} \qquad (6.2)$$

Выражение $\frac{\lambda\gamma}{8g}$ называют *коэффициентом аэродинамического сопротивления трению* (α), т.е.

$$\alpha = \frac{\lambda\gamma}{8g} \text{, Н·с}^2/\text{м}^4. \qquad (6.3)$$

Коэффициент α является важнейшей аэродинамической характеристикой горной выработки.

Тогда формула для расчета депрессии примет вид

$$h = \frac{\alpha \cdot P \cdot L}{S^3} \cdot Q^2. \qquad (6.4)$$

Величина $R = \frac{\alpha\ P\ L}{S^3}$ называется *аэродинамическим сопротивлением трения.* С учетом этого

$$h = RQ^2, \qquad (6.5)$$

где Q – объемный расход воздуха, м^3/с.

Эта формула выражает квадратичный закон сопротивлений для турбулентного движения воздуха.

Коэффициент α определяется экспериментальным путем в натурных условиях или на физических моделях горных выработок.

Значения α для различного рода выработок и видов крепи приведены в справочниках и руководствах по рудничной вентиляции.

Установлено, что на величину α влияет как *степень шероховатости*, так и продольная плотность расположения выступов, называемая *продольным калибром крепи* (рис. 6.2)

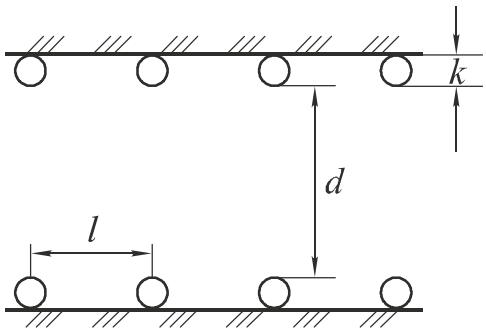


Рис. 6.2. Схема расположения элементов крепи в горной выработке

Степень шероховатости определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{k}{d},$$

где k – высота выступов шероховатости, м; d – гидравлический диаметр, м.

Продольный калибр крепи

$$\Delta = \frac{l}{k},$$

где l – расстояние между выступами шероховатости, м.

Максимальное значение α наблюдается при $\Delta = 4…6$.

В общем случае величина коэффициента α зависит от шероховатости и числа Re только в области ламинарного и переходного режимов, когда влияние сил вязкости очень велико ($Re < 2300$).

В условиях вполне развившегося турбулентного режима ($Re \geq 100000$) величина α от числа Re не зависит.

Таблица 6.1

Значения коэффициента α для горных выработок

Наименование горных выработок	α, Н·с^2/м^4
Вентиляционная скважина, армированная металлическими трубами	$2…6\cdot10^{-3}$
Выработки, закрепленные бетоном	$2…5\cdot10^{-3}$
Незакрепленные выработки	$6…20\cdot10^{-3}$
Металлическая крепь из спецпрофиля	$5…23\cdot10^{-3}$
Лавы, оборудованные комплексами	$45…120\cdot10^{-3}$

Способы снижения коэффициента α

Любые мероприятия, уменьшающие шероховатость выработок, их извилистость, загроможденность способствуют снижению значения α и сопротивления трения.

Для уменьшения коэффициента α применяют торкретирование стенок незакрепленных выработок, облицовку поверхности выработок листовым полимерным материалом, досками, затяжку межрамных пространств.

6.3. Местные сопротивления

К местным сопротивлениям относятся сопротивления, вызываемые резкими изменениями формы потока (рис. 6.3). Основные виды местных сопротивлений в шахтах:

- внезапные сужения, расширения и повороты (*а*, *б*, *г*);
- вентиляционные окна (*в*);
- места разветвлений горных выработок (*д*, *е*);
- кроссинги;
- места сопряжения стволов с горными выработками и каналами вентиляторов (*ж*).

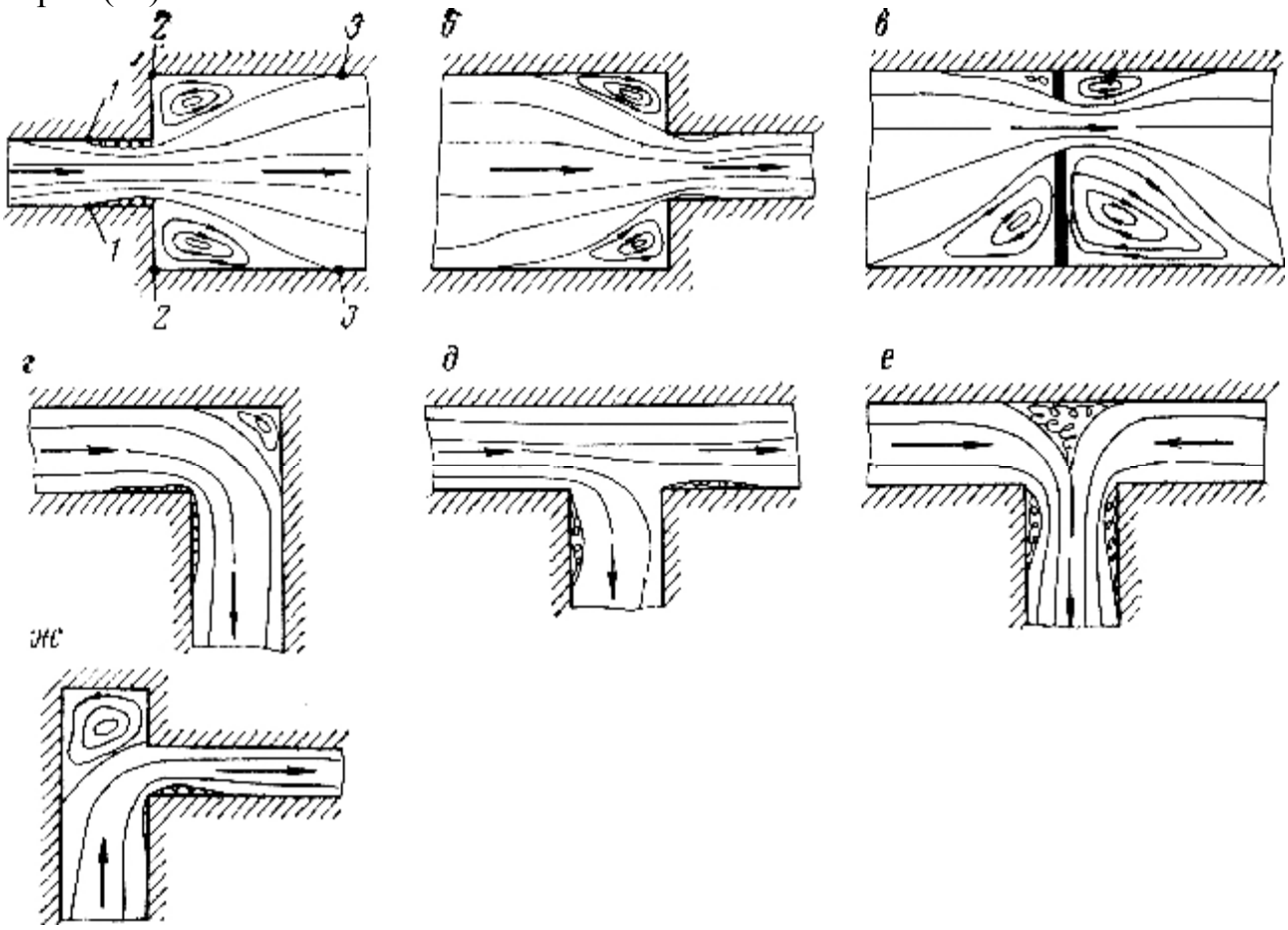


Рис. 6.3. Схемы местных сопротивлений в выработках

Для местных сопротивлений характерным является срыв струй с твердых границ потока, наличие вихреобразований и застойных зон.

Искажение профиля скоростей в горной выработке начинается на расстоянии (4…5)·$d_г$ до местного препятствия, а полное восстановление деформированного скоростного поля происходит на расстоянии (12…15)·$d_г$ от местного сопротивления. Этот суммарный участок длиной (16…20)·$d_г$, на котором имеют место повышенные потери, и считается объектом местного сопротивления.

Потери энергии на местном сопротивлении пропорциональны динамическому давлению. Расчет депрессии местного сопротивления производят по

формуле

$$h = \xi \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \text{, Н/м}^2,$$

где ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления; v – средняя скорость движения потока, м/с.

Выражая скорость через расход воздуха $v = \frac{Q}{S}$, получим

$$h = \xi \cdot \frac{\gamma}{2gS^2} \cdot Q^2 = R \cdot Q^2, \qquad (6.6)$$

где величина $R = \xi \frac{\gamma}{2gS^2}$ называется аэродинамическим сопротивлением местного сопротивления.

Величина ξ зависит от геометрических параметров и конфигурации местного сопротивления, а также от шероховатости выработок, определяется экспериментальным путем.

Снижение местных сопротивлений достигается путем создания плавных переходов от одного сечения выработки к другому, плавных поворотов, путем скашивания кромок, установки направляющих лопаток на поворотах, снижения сопротивления стенок выработок, отшивкой кутков (рис. 6.4).

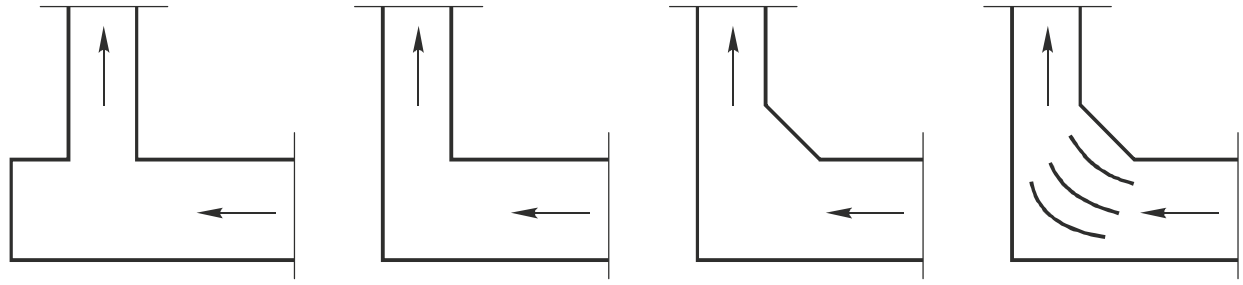


Рис. 6.4. Варианты снижения местных сопротивлений при поворотах

6.4. Лобовое сопротивление

Это сопротивление, оказываемое потоку телом, находящимся в нем. Величина лобового сопротивления обусловлена трением воздуха о поверхность обтекаемого тела и вихреобразованием за ним.

К лобовым сопротивлениям относят армировку шахтных стволов, вагонетки (рис.6.5), ремонтины, подъемные сосуды, стойки крепи в лавах.

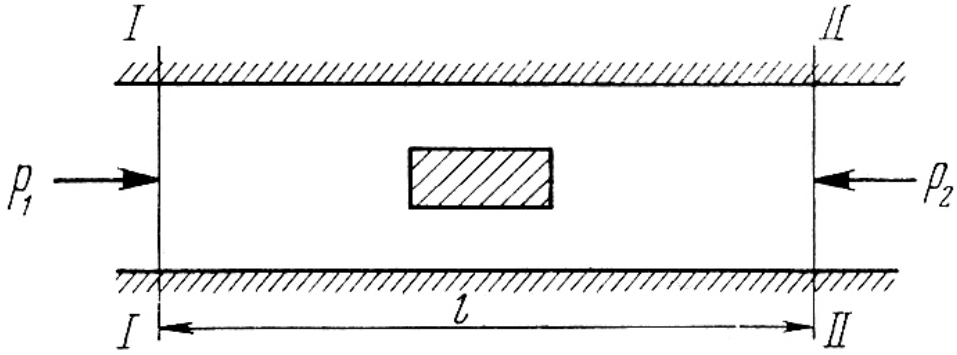


Рис. 6.5. Схема к определению депрессии лобового сопротивления

Сила сопротивления тела, обтекаемого турбулентным потоком пропорциональна динамическому давлению

$$F_л = c \cdot S_м \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \gamma \text{ , Н,}$$

где c – безразмерный коэффициент лобового сопротивления; $S_м$ – миделево сечение тела (площадь проекции тела, оказывающего лобовое сопротивление, на плоскость, перпендикулярную к направлению движения), м^2.

Если на участке обтекания тела условно пренебречь силами трения, то уравнение равновесия сил будет иметь следующий вид:

$$p_1 S = p_2 S + F_л$$

или

$$p_1 - p_2 = \frac{F_л}{S},$$

где S – сечение выработки, м^2.

Тогда

$$h_л = c \cdot \frac{S_м}{S} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g} \cdot \gamma .$$

Подставив $Q = v \cdot (S - S_м)$, получаем

$$h_л = c \frac{\gamma}{2g} \frac{S_м}{S(S - S_м)^2} Q^2 = RQ^2 , \qquad (6.7)$$

где $R = c \cdot \frac{\gamma}{2g} \cdot \frac{S_м}{S \cdot (S - S_м)^2}$ – аэродинамическое сопротивление объекта лобового сопротивления.

Коэффициент c зависит от формы, числа Re, шероховатости тела и определяется экспериментальным путем.

Для уменьшения лобовых сопротивлений телам придают, по возможности, обтекаемую форму (рис. 6.6). Особенно, это необходимо в глубоких стволах, армированных расстрелами.

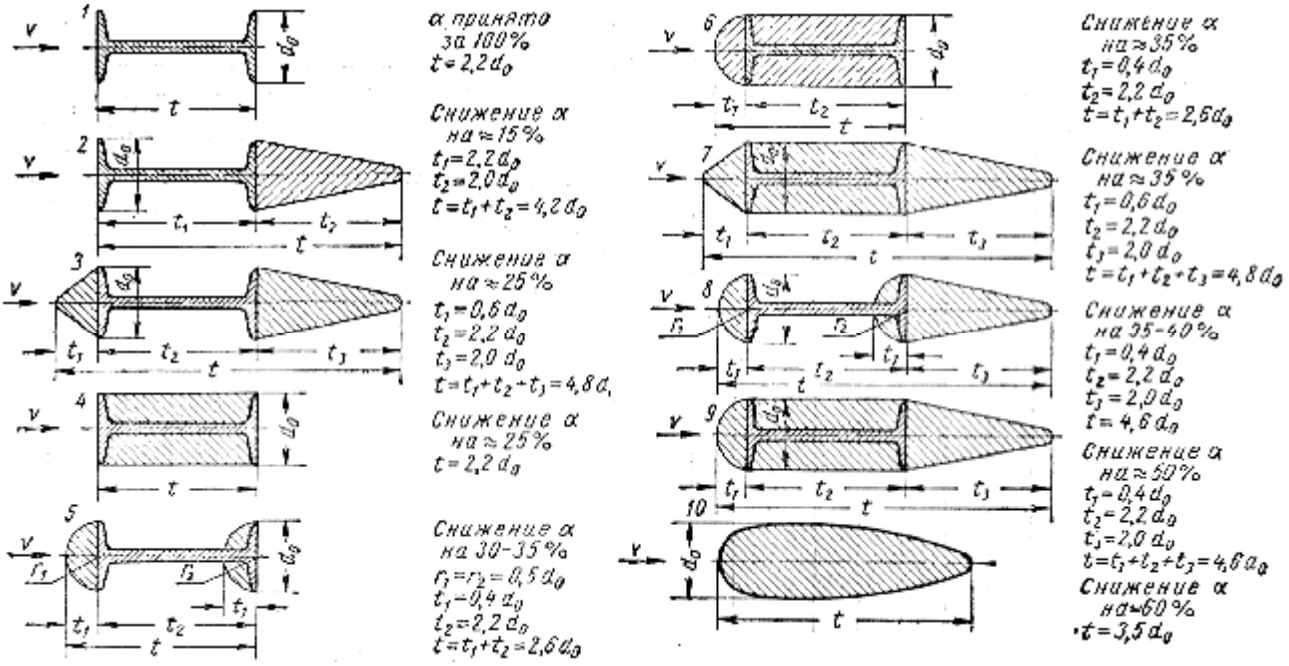


Рис. 6.6. Варианты уменьшения лобовых сопротивлений в глубоких стволах, армированных расстрелами

6.5. Единицы измерения аэродинамических параметров

Формулы для расчета депрессии сопротивления трения, местных и лобовых сопротивлений могут быть представлены в виде

$$h = R \cdot Q^2 .$$

Это соответствует квадратичному закону сопротивления при вполне развитом турбулентном режиме движения и указывает на единую природу сил, действующих в каждом из этих видов сопротивления.

Размерность сопротивления

$$[R] = \left[\frac{h}{Q^2}\right] = \frac{Н / м^2}{(м^3 / с)^2} = \frac{Н \cdot с^2}{м^8} .$$

В системе СИ единицей измерения депрессии является 1 Н/м^2. Такая единица носит название «паскаль» (Па); 1 Н/м^2=1 Па.

Для получения депрессии в паскалях по формулам (6.4), (6.6) и (6.7) необходимо входящие в них величины выражать в следующих единицах измерения: α – в Н·с^2/м^4; P и L – в м; S и $S_м$ – в м^2; Q – в м^3/с, ρ – в кг/м^3.

Иногда в качестве единицы измерения аэродинамического сопротивления используется величина под названием «мюрг» (μ); 1 μ = 0,00981 Н·с^2/м^8.

При вентиляционных расчетах используется также единица аэродинамического сопротивления, называемая «киломюрг» ($k\mu$) и равная 1000μ. Очевидно, что 1 $k\mu$ = 9,81 Н·с^2/м^8.

Иногда киломюрг называют большой единицей сопротивления, мюрг – малой.

Сопротивлением 1 кμ обладает выработка, по которой при давлении 9,81 Па (1 мм вод. ст.) проходит 1 м^3/с воздуха.

Соотношение между аэродинамическим сопротивлением, выраженным в киломюргах (R) и в мюргах (r), следующее

$$R = \frac{r}{1000}.$$

Эквивалентное отверстие

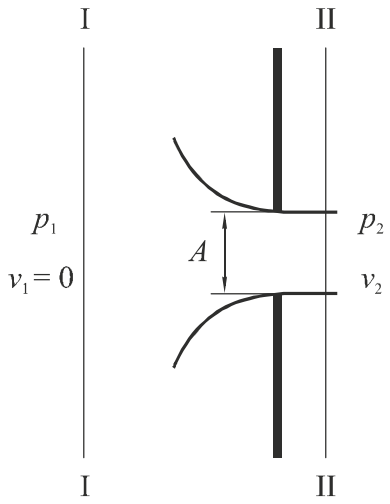


Рис. 6.7. К выводу величины эквивалентного отверстия шахты.

В рудничной вентиляции и особенно в вентиляторостроении принимается единица сопротивления – эквивалентное отверстие A, под которым подразумевается круглое отверстие в тонкой стенке, сопротивление которого равно сопротивлению шахты (рис. 6.7).

Величина эквивалентного отверстия позволяет судить о трудности проветривания шахты.

Выражение для эквивалентного отверстия можно получить, применяя уравнение Бернулли к движению воздуха через круглое отверстие.

Для двух сечений горизонтального потока воздуха через отверстие в стенке:

I – в неограниченном пространстве, v_1=0;

II – в наиболее узкой части потока;

уравнение Бернулли имеет вид:

$$p_1 = p_2 + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \lambda \qquad \text{или} \qquad p_1 - p_2 = \frac{v_2^2}{2g}\lambda .$$

Выразим v_2 через расход воздуха Q и площадь A, получим

$$v_2 = \frac{Q}{A \cdot \varphi},$$

где $\varphi = 0{,}65$ – коэффициент сужения потока.

Тогда

$$h = \frac{Q^2 \gamma}{2g\varphi^2 A^2}.$$

Откуда

$$A = \frac{Q}{\varphi\sqrt{\frac{2gh}{\gamma}}}$$

Приняв $\varphi = 0{,}65$; g = 9,81 м/с^2; γ = 11,77 Н/м^3 получим

$$A = 1{,}2\frac{Q}{\sqrt{h}},\ \text{м}^2.$$

Так как $h = R \cdot Q^2$, то $A = \frac{1{,}2}{\sqrt{R}}$, откуда $R = \frac{1{,}44}{A^2}$.

Шахты по величине эквивалентного отверстия делятся на три группы:
1) труднопроветриваемые шахты, имеющие $A < 1$ м^2;
2) средние по трудности проветривания, имеющие $A = 1\ldots2$ м^2;
3) шахты, легкие для проветривания, имеющие $A > 2$ м^2.

6.6. Депрессия

Трение воздушного потока о стенки требует затрат энергии на его преодоление в процессе движения воздуха. Это приводит к тому, что статическое давление, характеризующее энергию единицы объема воздуха, в ограниченных потоках уменьшается в направлении движения воздуха.

Потеря давления в воздуховодах зависит от его формы, размеров, шероховатости его стенок и скорости движения воздуха. Опытным путем установлено, что потери на трение пропорциональны динамическому давлению.

Величина h, равная разности статических давлений, называется статической депрессией. Для краткости статическую депрессию называют просто депрессией. Депрессия является важнейшим энергетическим показателем ограниченных потоков. Зная ее величину, можно выбрать вентилятор, необходимый для приведения в движение воздуха в трубопроводе (выработке) с данной скоростью.

Общая депрессия воздухопровода равна сумме депрессий трения, местных и лобовых сопротивлений

$$h_o = h_m + h_м + h_л.$$

Для условий горных выработок депрессия трения является преобладающей. Депрессия местных сопротивлений обычно составляет $(0{,}1\ldots0{,}15)\cdot h_m$. Для армированных стволов и лав учитывается депрессия лобовых сопротивлений.

6.7. Характеристика воздухопровода

Из формул (6.4), (6.6) и (6.7) следует, что общую депрессию можно выразить в виде (индекс при h опускаем)

$$h = R \cdot Q^2, \qquad (6.8)$$

где R – суммарное аэродинамическое сопротивление воздухопровода.

Выражение (6.8), а также его график (рис. 6.8) называются аэродинамическими характеристиками воздухопровода.

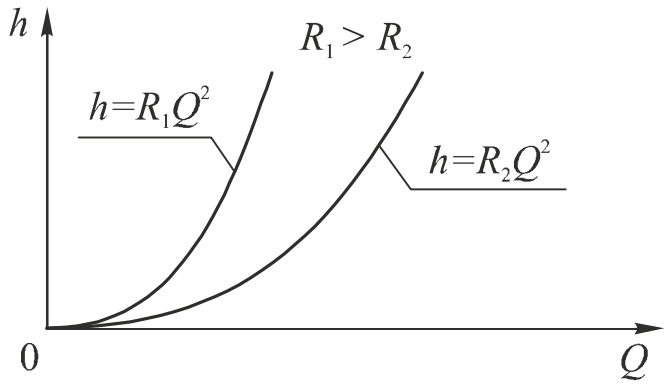


Рис. 6.8. Аэродинамические характеристики воздухопровода

Из рис. 6.8 видно, что характеристика воздухопровода проходит тем круче, чем больше сопротивление воздухопровода, и она может быть построена для одного трубопровода или для их системы, для одной выработки или шахты в целом.

6.8. Силы, формирующие движение воздуха в карьере

Воздух в карьере может перемещаться за счет энергий ветра, термических сил, разности статических давлений, а также за счет технологических факторов.

Если на массы воздуха, которые перемещаются со скоростью u_1, действует *кинетическая энергия ветрового потока*, то их скорость будет возрастать до u_2. Увеличение кинетической энергии масс воздуха, двигающихся с ускорением, согласно уравнению Бернулли будет равно

$$\Delta E = \frac{\rho}{2}\left(u_1^2 - u_2^2\right), \qquad (6.9)$$

где ρ – плотность воздуха.

При идеальном движении увлекаемых масс воздуха (отсутствии сопротивления), формула (6.9) определяет энергию, которую потерял ветровой поток, увеличивая скорость увлекаемых масс с u_1 до u_2.

При реальном движении (наличии сопротивления, например, силы трения воздуха о твердую поверхность) потеря энергии ветрового потока будет

$$\Delta E' = \Delta E + \Delta E_{conp},$$

где ΔE_{conp} – потеря энергии ветрового потока на преодоление сопротивления.

Так как формула (6.9) выражает изменение кинетический энергии единицы объема воздуха, то размерность $|\Delta E|$ = Н·м/м^3 = Н/м^2.

Основным естественным фактором, за счет которого обеспечивается проветривание карьера, является энергия ветра. С увеличением глубины карьера значение естественного проветривания уменьшается.

Согласно существующим данным, эффективное проветривание карьеров при помощи энергии ветра возможно до глубины 200 м.

Термические силы появляются при разности температур отдельных объемов воздуха. В этом случае плотность объемов воздуха отличается от плотно-

сти окружающей среды, вследствие чего развивается выталкивающая сила.

Величина термической силы определяется эффективностью теплоисточников, действующих в карьере, и, в первую очередь, от инсоляции (облучения солнцем) бортов и дна карьера.

Среди естественных сил, вызывающих движение воздуха в карьере, термические силы имеют второстепенное значение после ветровых сил по значимости в процессе проветривания, поэтому интенсивность проветривания при действии только термических сил незначительная. Однако эти силы имеют определяющее значение при достаточно сильном охлаждении воздуха в карьерах или во всем приземном слое в районе карьера, так как при этом они затрудняют или даже приостанавливают на длительный период естественное проветривание карьеров.

При некоторых *технологических процессах* в карьере могут выделяться значительные количества энергии в воздух, тем самым создавая условия для его движения. Это, прежде всего, производство взрывных работ, для ведения которых применяется большое количество ВВ. При взрыве ВВ воздух в карьере получает мощный импульс, направленный вверх, действие которого в первом приближении можно рассматривать как состоящее из динамического воздействия распространяющихся при взрыве газов ВВ и разлетающихся кусков пород и из термического воздействия горючих газов ВВ в объеме карьера. Энергия этого импульса бывает достаточной для выноса за пределы карьера значительных количеств газов ВВ и пыли.

Определенное влияние на локальное состояние воздушной среды могут оказывать гидромониторные струи.

Под действием перечисленных сил атмосфера карьера приходит в определенное состояние, которое характеризуется наличием поступательного и пульсационного движений воздуха.

Основными силами, формирующими поступательное движение воздуха в карьере, являются силы ветра и термические силы.

Пульсационное движение образуется в результате заноса вихрей в карьер с поверхности и дополнительного воздействия на атмосферу, главным образом, термических сил. При этом турбулизация атмосферы карьера, из-за проявления пульсационных движений, может отличаться от поверхностной как в большую, так и в меньшую стороны.

Вопросы для самоконтроля

1. Аэродинамическое сопротивление. Виды сопротивлений.
2. Сопротивление трения.
3. Местные сопротивления.
4. Лобовые сопротивления.
5. Коэффициент аэродинамического сопротивления α; как определяется и от чего зависит его величина?
6. Способы снижения коэффициента α?

7. Режимы движения воздуха.
8. Какие сопротивления относятся к местным?
9. Что считается объектом местного сопротивления?
10. Как определяется величина местного сопротивления?
11. Что такое лобовое сопротивление?
12. Как определяется величина лобового сопротивления?
13. Способы снижения лобового сопротивления.
14. Единицы сопротивления.
15. Определение общей депрессии воздухопровода.
16. Характеристика воздухопровода.
17. Силы, формирующие движение воздуха в карьере.

РАЗДЕЛ 7. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СЕТИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в седьмом разделе пособия:

- осуществлять построение схемы вентиляции шахты;
- отображать схему вентиляционных соединений;
- составлять баланс воздуха для узла сети;
- охарактеризовать виды соединения горных выработок и их особенности;
- осуществлять расчет последовательного и параллельного соединений выработок;
- владеть графоаналитическим методом расчета соединения выработок;
- выявлять диагональные соединения выработок на схеме вентиляции шахты;
- анализировать изменение дебита воздуха в диагональном соединении выработок;
- охарактеризовать основные схемы естественного проветривания карьера;
- анализировать условия и эффективность применения различных схем проветривания карьеров.

7.1. Основные понятия и соотношения

Вентиляционная сеть – совокупность связанных между собой горных выработок, по которым движется воздух.

Вентиляционный план – вычерченный в масштабе план горных выработок, на котором указаны вентиляционные сооружения и направления движения воздуха.

Схема вентиляции – схематический чертеж, на котором показано взаимное расположение горных выработок, вентиляторов, вентиляционные сооружения и направления движения воздуха (рис. 7.1).

Схема вентиляционных соединений – упрощённый график сети, не отражающий пространственного расположения выработок, на котором сохраняется взаимосвязь всех элементов сети (рис. 7.2).

Узел сети – место соединения двух и более разных выработок (1, 2, ... , 12).

Ветвь – путь движения воздуха между двумя смежными узлами (1-2).

Контур – замкнутое соединение нескольких ветвей схемы (10-11-12-7-10).

Направление – последовательное соединение ветвей от пункта входа воздуха в шахту через обособленно вентилируемый объект проветривания до пункта выхода из шахты (1-2-3-10-11-12-7-8-9).

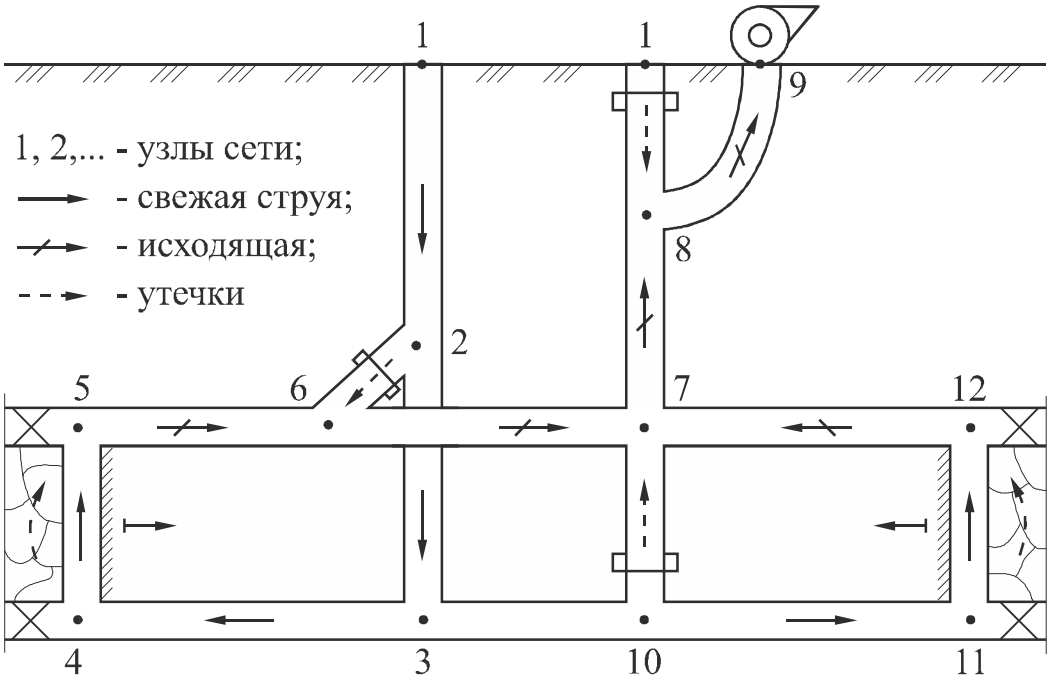


Рис. 7.1. Схема вентиляции шахты

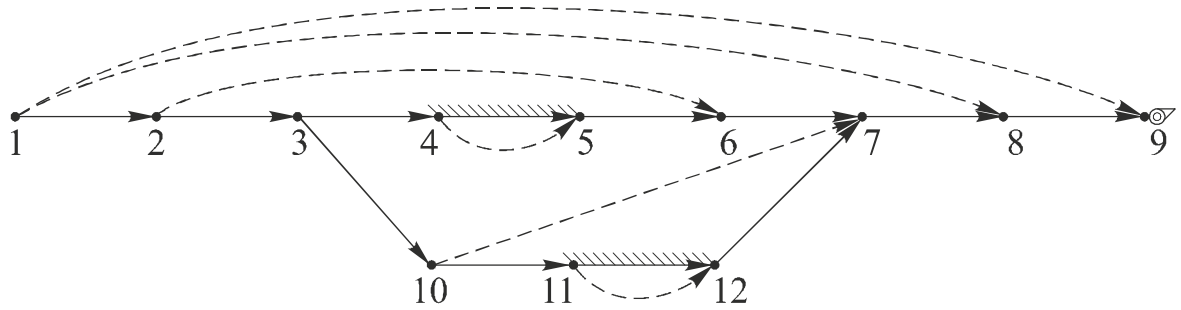


Рис. 7.2. Схема вентиляционных соединений

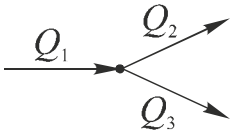
Законы вентиляционных сетей

Движения воздуха в вентиляционной сети подчиняется законам сохранения массы и энергии.

Согласно 1-го закона сетей (закона сохранения массы), алгебраическая сумма расходов воздуха в узле равна 0. Поэтому для узла (рис. 7.3) имеет место соотношение

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i = 0$$

где n – число ветвей в данном узле; Q_i – расход воздуха в i–й ветви, входящей в узел; принимается со знаком (+), если воздух притекает к узлу и со знаком (–), если воздух вытекает из узла.



$$Q_1 + (-Q_2) + (-Q_3) = 0$$

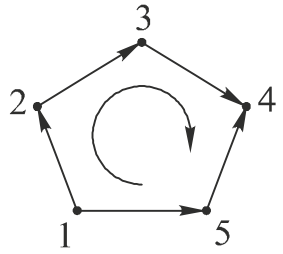
$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

Рис. 7.3. Узел вентиляционной сети

Для замкнутого контура (рис. 7.4) при отсутствии в нем источников тяги справедлив второй закон сетей: алгебраическая сумма депрессий всех ветвей равна нулю

$$\sum_{j=0}^{m} h_j = 0,$$

где m – число ветвей в контуре; h_j – депрессия j – й ветви, принимается со знаком (+), если направление движения воздуха совпадает с направлением обхода контура и со знаком (–), если направления противоположны.



Для приведенного контура в соответствии со вторым законом сетей можно записать:

$$h_{12} + h_{23} + h_{34} + (-h_{45}) + (-h_{51}) = 0,$$

т.е.

$$\Delta p_{1-2-3-4-5-1} = 0.$$

Рис. 7.4. Контур вентиляционной сети

При наличии источников тяги с суммарной депрессией H

$$\sum_{j=0}^{m} h_j = H$$

т.е. потеря депрессии в контуре равна суммарной депрессии источника тяги.

В зависимости от взаимного расположения выработок в схеме различают три основных вида соединений:

последовательное, когда выработки примыкают одна к другой без ответвлений;

параллельное, когда выработки имеют общие точки начала и конца;

диагональное, когда выработки имеют общие начало и конец и, кроме того, они соединяются между собой одной (рис. 7.5) или несколькими диагоналями.

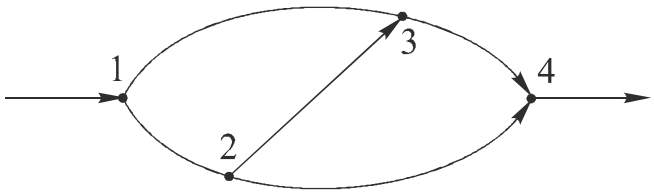


Рис. 7.5. Диагональное соединение выработок

Если в схеме одновременно присутствует два или три вида соединения выработок, то такая схема называется *комбинированной*.

7.2. Методы расчета вентиляционных сетей

Основные задачи расчета вентиляционных сетей заключаются в нахождении общего аэродинамического сопротивления сети и естественного распреде-

ления воздуха в ее ветвях. Кроме этого, при расчётах шахтных вентиляционных сетей определяют рабочий режим вентиляторов, аэродинамическое сопротивление регуляторов расхода воздуха в сети и значение естественной тяги.

В зависимости от сложности вентиляционной сети эти задачи могут быть решены аналитическим, графическим, графоаналитическим или приближенными (итерационными) методами с использованием компьютерных программ, а также методами моделирования.

Аналитические методы базируются на использовании первого и второго законов сетей. Эти методы используются для расчета последовательного, параллельного и простого диагонального соединений.

7.2.1. Последовательное соединение выработок

Схема последовательного соединения и его параметры представлены на рис. 7.6.

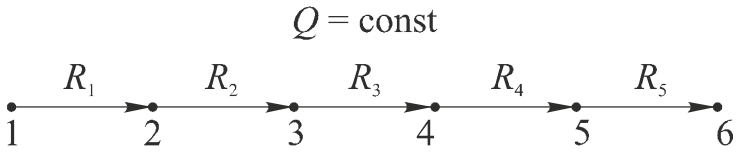


Рис.7.6. Последовательное соединение

В этом случае общие потери давления (депрессия соединения) равна сумме потерь давления в отдельных ветвях

$$h = h_1 + h_2 + \ldots + h_n = \sum_{i=1}^{n} h_i \ .$$

Так как расход воздуха (Q) в ветвях является неизменным, то это соотношение можно записать в виде

$$RQ = R_1Q + R_2Q + \ldots + R_nQ = \sum_{i=1}^{n} R_iQ \ .$$

После сокращения обоих частей равенства на Q можно сделать вывод, что общее сопротивление соединения равно сумме сопротивлений отдельных ветвей

$$R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n = \sum_{i=1}^{n} R_i \ .$$

Выразив сопротивление через эквивалентное отверстие $R = \dfrac{1{,}44}{A^2}$ получим

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \ldots + \frac{1}{A_n^2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{A_i^2} \ .$$

7.2.2. Параллельное соединение выработок

Схема параллельного соединения горных выработок и его параметры представлены на рис. 7.7.

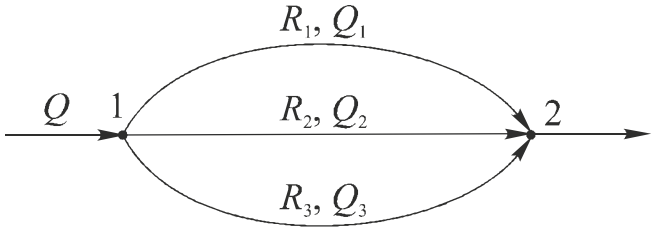


Рис. 7.7. Параллельное соединение выработок

Депрессии отдельных ветвей параллельного соединения всегда равны между собой, что вытекает из определения депрессии как разности давлений между двумя точками (началом и концом соединения)

$$h = h_1 = h_2 = ... = h_n . \tag{7.1}$$

Согласно первому закону вентиляционных сетей

$$Q = Q_1 + Q_2 + ... + Q_n$$

Выразим выражение (7.1) через сопротивления ветвей и расход воздуха в них

$$RQ^2 = R_1Q_1^2 = R_2Q_2^2 = ... = R_nQ_n^2 , \tag{7.2}$$

где R – общее сопротивление параллельного соединения.

Уравнение (7.2) можно переписать в виде

$$Q\sqrt{R} = Q_1\sqrt{R_1} = Q_2\sqrt{R_2} = ... = Q_n\sqrt{R_n}$$

или

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{1}{R}}} = \frac{Q_1}{\sqrt{\frac{1}{R_1}}} = \frac{Q_2}{\sqrt{\frac{1}{R_2}}} = ... = \frac{Q_n}{\sqrt{\frac{1}{R_n}}} .$$

Если почленно сложим числители и знаменатели равных дробей, то получим новую дробь, равную каждой из сложенных дробей, можно записать

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{1}{R}}} = \frac{Q_1 + Q_2 + ... + Q_n}{\sqrt{\frac{1}{R_1}} + \sqrt{\frac{1}{R_2}} + ... + \sqrt{\frac{1}{R_n}}} . \tag{7.3}$$

Т.к. в выражении (7.3) числители правой и левой части равны между собой, то равны и их знаменатели

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + ... + \frac{1}{\sqrt{R_n}} . \tag{7.4}$$

Из выражения (7.4) можно найти величину общего сопротивления соединения при известных значениях сопротивления ветвей.

Учитывая, что $A = \frac{1{,}2}{\sqrt{R}}$, после умножения всех членов уравнения (7.4) на

1,2 получим

$$A = A_1 + A_2 + \ldots + A_n = \sum_{i=1}^{n} A_i .$$

Из выражения (7.4) следует, что общее сопротивление параллельного соединения всегда меньше сопротивления любой его ветви. Так, если сопротивление всех ветвей одинаково и равно некоторой величине R_1, то для параллельного соединения из двух ветвей общее сопротивление будет

$$R = \frac{R_1}{4},$$

из трех ветвей

$$R = \frac{R_1}{9},$$

так как $R_1 = R_2$, то

$$\frac{1}{\sqrt{R}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_1}} = \frac{2}{\sqrt{R_1}}; \qquad \frac{1}{R} = \frac{4}{R_1}; \qquad R = \frac{R_1}{4}.$$

Следовательно, сопротивление вентиляционной сети шахты будет тем меньше, чем больше параллельных ветвей она содержит.

Распределение воздуха

Рассмотрим распределение воздуха для простого параллельного соединения (рис. 7.8).

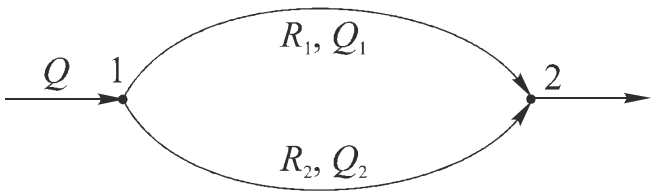


Рис. 7.8. Простое параллельное соединение

Из определения параллельного соединения следует

$$h = R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2 .$$

Откуда

$$\sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Прибавим в последнее выражение к правой и левой части +1:

$$\sqrt{\frac{R_1}{R_2}} + 1 = \frac{Q_2}{Q_1} + 1 = \frac{Q_2 + Q_1}{Q_1} = \frac{Q_{общ.}}{Q_1}.$$

Откуда

$$Q_1 = \frac{Q_{общ.}}{\sqrt{\frac{R_1}{R_2}} + 1}.$$

Аналогично

$$Q_2 = \frac{Q_{общ.}}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}} + 1}.$$

Для n параллельных выработок

$$Q_1 = \frac{Q_{общ.}}{\sqrt{\frac{R_1}{R_2}} + \sqrt{\frac{R_1}{R_3}} + ... + \sqrt{\frac{R_1}{R_n}} + 1}.$$

Или в общем виде

$$Q_i = \frac{Q_{общ.}}{\sqrt{\frac{R_i}{R_1}} + \sqrt{\frac{R_i}{R_2}} + ... + 1}.$$

Расчет параллельного соединения можно производить графическим путем (рис. 7.9). Для этого в координатах (Q, H) строятся характеристики ветвей R_1 и R_2 и суммарная характеристика $R_{общ.}$ путем сложения абсцисс характеристик R_1 и R_2 при разных, произвольно взятых, значениях депрессий.

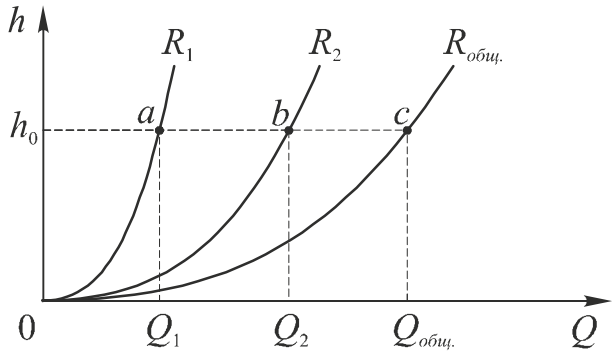


Рис. 7.9. Расчет параллельного соединения графическим путем

Если известна общая депрессия, то абсциссы точек a, b, c пересечения линии h_0 с кривыми R_1, R_2, $R_{общ.}$ определяют дебиты Q_1, Q_2, $Q_{общ.}$ и, наоборот, если известен общий дебит $Q_{общ.}$, то можно определить h_0 и дебит Q_1, и Q_2.

7.2.3. Диагональное соединение выработок

На практике диагональные соединения встречаются нередко. На рис. 7.10 представлены схема вентиляции шахты с диагональным соединением выработок и схема вентиляционных соединений. В диагональном соединении параллельные выработки соединены между собой отдельной выработкой, называемой диагональю.

Соединения с одной диагональю называются простыми, а с двумя и более – сложными.

Аналитическим методом относительно просто рассчитывается лишь простые диагональные соединения.

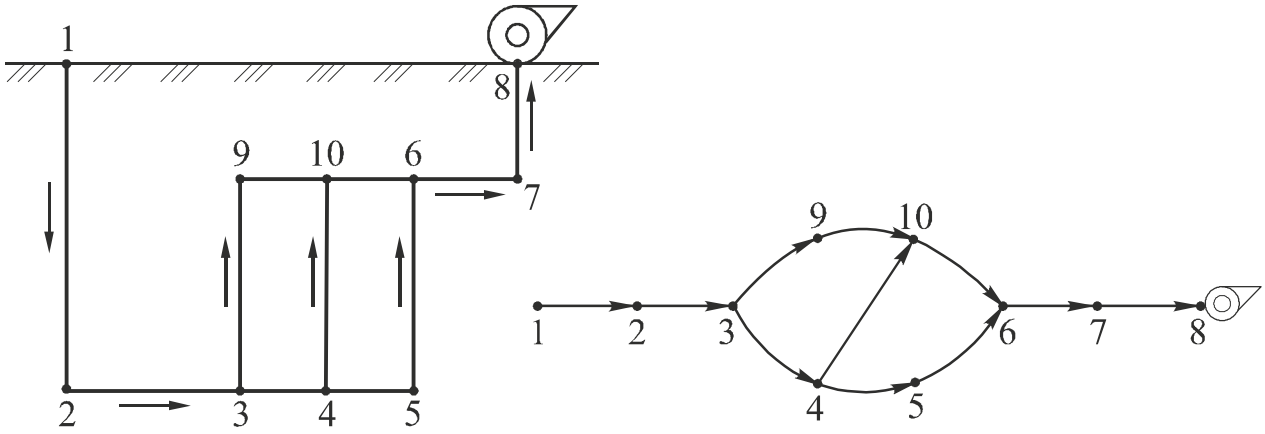


Рис. 7.10. Диагональное соединение горных выработок

Характерной особенностью диагоналей является возможность изменения дебита воздуха и направления его движения в диагоналях при изменении соотношения сопротивления параллельных ветвей (рис. 7.11).

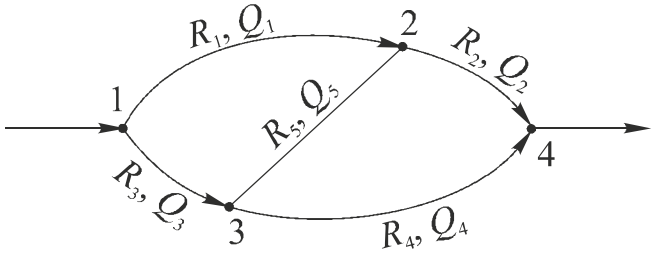


Рис. 7.11. Схема к расчету диагонального соединения

Условием отсутствия движения воздуха в диагонали является выполнение равенства

$$p_2 = p_3 .$$

Следовательно $h_{1-2} = h_{1-3}$ и $h_{2-4} = h_{3-4}$ или

$$R_1 \cdot Q_1^2 = R_3 \cdot Q_3^2 \quad \text{и} \quad R_2 \cdot Q_2^2 = R_4 \cdot Q_4^2 . \qquad (7.5)$$

Поделим почленно выражение (7.5)

$$\frac{R_1 \cdot Q_1^2}{R_2 \cdot Q_2^2} = \frac{R_3 \cdot Q_3^2}{R_4 \cdot Q_4^2} .$$

Т.к. движение в диагонали отсутствует, то $Q_1 = Q_2$, а $Q_3 = Q_4$.

После сокращения получим, что движение воздуха в диагонали отсутствует при соблюдении условия

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} .$$

При $\frac{R_1}{R_2}$ **f** $\frac{R_3}{R_4}$ воздух движется от точки 3 к точке 2.

При $\frac{R_1}{R_2}$ **р** $\frac{R_3}{R_4}$ воздух движется от точки 2 к точке 3.

Из приведенных соотношений видно, что сопротивление диагонали не оказывает влияния на направление движения в ней.

Неустойчивость движения воздуха в диагоналях может вызвать загазирование лав, а если диагонали являются путями утечек – то и появление на свежих струях взрывных и ядовитых газов.

Если лава является диагональю соединения, то направление движения воздуха в ней может поменяться на противоположное при изменении соотношения сопротивлений ветвей соединения.

Аналитический расчет диагональных соединений весьма сложен, поэтому используют графоаналитические методы расчета и используют пакеты прикладных компьютерных программ.

7.3. Основные схемы естественного проветривания карьеров

Карьер является частью земной поверхности. Поэтому воздухообмен в нем в значительной степени определяется теми же факторами, что и воздухообмен над земной поверхностью в целом: скоростью ветра и распределением температуры в приземном слое воздуха.

Наиболее эффективно проветривается карьер при применении энергии ветра с достаточно высокими его скоростями. В этом случае в карьере образуется либо свободная (рис. 7.13, *а*), либо полуограниченная (рис. 7.13, *б*) струя, обеспечивающая эффективный вынос вредностей из карьера.

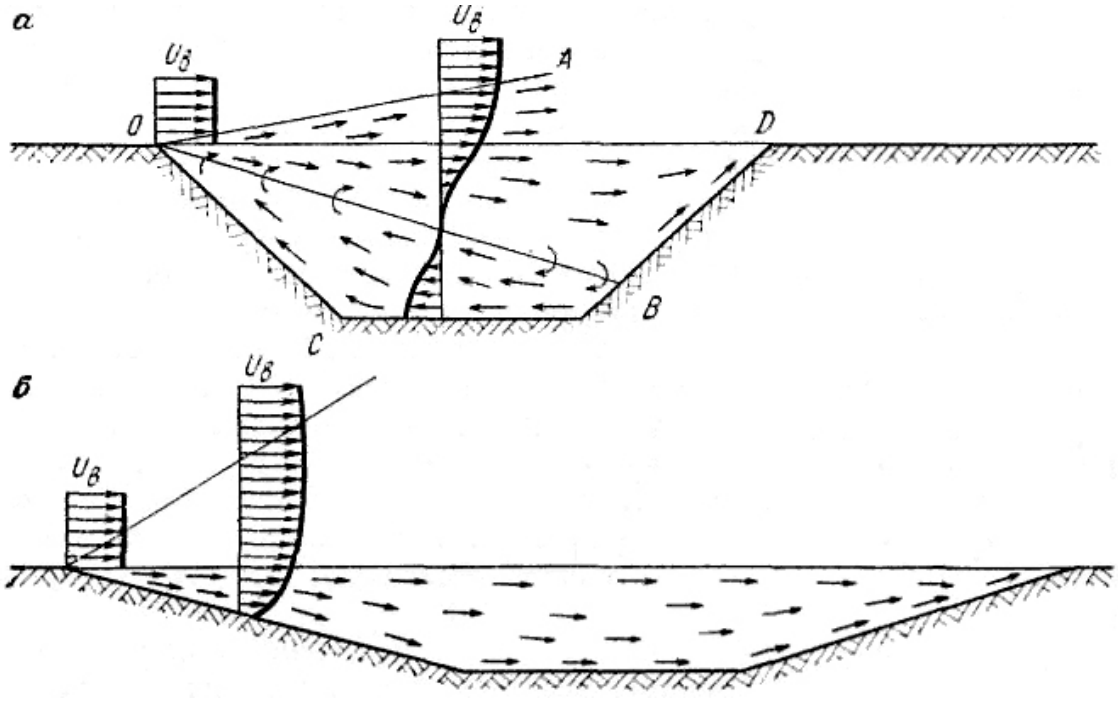


Рис. 7.13. Схемы проветривания карьера энергией ветра: *а* – рециркуляционная; б – прямоточная

Свободная струя образуется при большом угле откоса борта карьера и поэтому встречается чаще, чем полуограниченная.

Основными схемами движения воздуха при естественном проветривании карьеров являются:

- рециркуляционная;
- прямоточная;
- конвективная;
- инверсионная.

Рециркуляционная схема проветривания. Схема проветривания свободной струей называется рециркуляционной, поскольку наличие обратной струи второго рода в зоне *OBCO* приводит к многократной циркуляции (рециркуляции) некоторой части воздуха в объеме карьера. При этом свободная струя *AOB* будет приносить к борту *CO* вредности, выделяющиеся на участке *OCB* и заносимые в струю рециркуляционным потоком. Часть этих вредностей будет вновь поступать в зону *OBCO,* что со временем может привести к накоплению в ней значительного количества вредностей. По этой причине зоны, подобные *OBCO,* называются застойными.

Прямоточная схема проветривания. Схема проветривания с полуограниченной струей называется прямоточной, так как воздух в объеме всего карьера движется в одном направлении. Эта схема более эффективна в связи с тем, что она не имеет застойных зон и скорость воздуха в карьере мало отличается от скорости ветра $u_в$ на поверхности. Однако она встречается преимущественно при неглубоких разработках или в карьерах с очень пологими бортами.

Конвективная схема проветривания. Если воздух в карьере подогревается нагретыми поверхностями (борта, дна) за счет солнца, протекания окислительных процессов, эндогенного тепла горных пород, то в этом случае прилегающие к ним слои воздуха становятся более легкими и поднимаются к поверхности, двигаясь вдоль бортов. Этот поток выносит из карьера вредности. Такая схема называется конвективной. От латинского convectio – перенесение; имеется в виду термическая конвекция. Эффективность проветривания карьера при этой схеме низкая. Конвективная схема образуется при положительном вертикальном градиенте температуры воздуха в карьере, превышающем адиабатический.

Инверсионная схема движения воздуха. С увеличением глубины разработки, при охлаждении воздуха (температурный градиент менее адиабатического) последний становится более тяжелым и, стремясь занять более низкое положение, опускается на дно карьера. При этом на дно заносятся и все вредности, выделяющиеся на уступах более высоких горизонтов. Постепенно глубокие участки карьера (или даже весь карьер) заполняются большими количествами вредностей, препятствующими безопасному ведению работ. Такая схема движения воздуха называется инверсионной. От латинского inversio – перестановка. При инверсионной схеме движения воздуха вынос вредностей из карьера практически не происходит. В этом случае следует говорить не о проветривании карьера, а об его отсутствии.

Кроме отмеченных четырех основных схем движения воздуха в карьерах

могут возникать их комбинации:

– *рециркуляционно-прямоточная* (одна часть карьера у подветренного борта проветривается по рециркуляционной схеме, вторая, где свободная струя достигает дна и движется вдоль него – по прямоточной);

– *инверсионно-конвективная* (по одному – теплому борту – воздух поднимается, по другому – холодному (теневому) – опускается);

– *прямоточно-рециркуляционная*.

Вопросы для самоконтроля

1. Основные понятия о шахтной вентиляционной сети.
2. Законы вентиляционных сетей.
3. Схемы соединения горных выработок м их особенности.
4. Методы расчёта вентиляционных сетей.
5. Расчет последовательного соединения выработок.
6. Расчет параллельного соединения выработок.
7. Расчет диагонального соединение выработок.
8. Расчет соединения горных выработок графическим методом.
9. Рециркуляционная схема проветривания карьеров.
10. Прямоточная схема проветривания карьеров.
11. Конвективная схема проветривания карьеров.
12. Инверсионная схема движения воздуха в карьере.
13. Комбинированные схемы естественного проветривания карьеров.

РАЗДЕЛ 8. ПЫЛЕГАЗОДИНАМИКА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в восьмом разделе пособия:

– определять вид процесса переноса газов в карьере, охарактеризовать его особенности;

– различать диффузионно активные и пассивные газы;

– рассчитывать коэффициент турбулентной диффузии газа;

– выявлять и идентифицировать источники выделения вредных газов в карьере;

– отображать факел распространения газа от точечных и линейных источников, наносить на схему их параметры;

– определять концентрацию газа в любой точке факела для точечного и линейного источников загрязнения атмосферы карьера;

– охарактеризовать распространение газов при взрывных работах и факторы, влияющие на этот процесс;

– определять факторы, влияющие на сдувание воздушным потоком осевших твердых частиц (пыли);

– рассчитывать концентрацию пыли в любой точке факела для точечного и линейного источников загрязнения атмосферы карьера;

– анализировать физические процессы выброса пылегазового облака при массовых взрывах в карьерах;

– отображать схему формирования пылегазового облака при массовом взрыве и распределение пылевых фракций в облаке в зависимости от среднего диаметра частиц;

– определять объем и температуру пылегазового облака на различных этапах формирования последнего;

– рассчитывать высоту подъёма пылевого облака с учётом дисперсности частиц;

– находить скорость осаждения пылевых частиц из пылегазового облака при различных числах Рейнольдса;

– оценивать параметры рассеивания пылевого облака при массовых взрывах в карьерах и факторы, влияющие на данный процесс;

– отображать схему рассеивания пылевого облака после массового взрыва в карьере;

– рассчитывать геометрические параметры зоны рассеивания пылевого облака при массовом взрыве под действием ветра;

– находить значения максимального диаметра пылевых частиц, которые могут быть вынесены за пределы карьера воздушными потоками;

– охарактеризовать запыленность атмосферы карьера в целом.

8.1. Основные понятия газовой динамики карьеров

Газовый динамикой называется раздел аэрологии карьеров, изучающий распространение газообразных примесей в атмосфере карьера.

Процессы переноса газов можно разделить на стационарные, основные характеристики которых не изменяются во времени, и нестационарные, изменяющиеся во времени.

Стационарные процессы – это процессы переноса газов, выделяющихся с постоянной интенсивностью (например, с обнаженных поверхностей карьера, из грунтовых вод, при горении отвалов, при работе постоянного числа автосамосвалов в карьере и т. п.), при неизменном аэродинамическом режиме атмосферы карьера (постоянные скорость ветра и температурная стратификация атмосферы карьера).

Нестационарные процессы – это процессы переноса газов после взрывных работ, процесс накопления газов в карьере при инверсиях и т. п.

Различают конвективный, молекулярный и турбулентный переносы.

Молекулярный и турбулентный переносы называют молекулярной и турбулентной диффузией. Если одновременно происходят конвективный и молекулярный (турбулентный) переносы, говорят о конвективной молекулярной (турбулентной) диффузии.

При молекулярной диффузии распространение вещества происходит в результате взаимного проникновения молекул в диффундирующих средах.

При турбулентной диффузии происходит обмен объемами, содержащими диффундирующие среды. Поскольку даже весьма малые объемы, участвующие в турбулентном обмене, значительно больше отдельных молекул, турбулентная диффузия протекает в сотни и тысячи раз более интенсивно, чем молекулярная.

Конвективный перенос газа осуществляется в направлении движения потока воздуха. Он является основным, обеспечивающим вынос газообразных примесей из карьера.

Молекулярный и турбулентный переносы происходят во всех направлениях от источника газовыделения. Они способствуют распространению газообразной примеси во всем объеме карьера и, следовательно, в конечном итоге уменьшению концентрации газа в воздухе.

Наиболее благоприятным является такое состояние атмосферы карьера, при котором обеспечивается интенсивный конвективный и турбулентный перенос газообразных примесей.

Удельный вес каждого газопереноса зависит от аэродинамических условий в карьере.

При больших скоростях ветра в карьере преобладающим является конвективный перенос, а при термических конвективных движениях воздуха, когда скорость ветра незначительная или равна нулю – турбулентный перенос. В условиях штилевой погоды при инверсионных состояниях атмосферы карьера преобладающим является молекулярный перенос, особенно под уровнем инверсии.

Если диффундирующий в воздушном потоке газ по плотности сущест-

венно отличается от плотности воздуха, то он будет изменять интенсивность диффузии газа. Например, выделение со дна карьера тяжелых газов (CO_2 и др.) может уменьшить турбулизацию воздуха у дна и, как следствие, сократить перенос газа в верхние слои внутрикарьерного пространства; создаются условия для накопления газа в карьере.

Чем меньше турбулентность атмосферы, тем больше будет влияние тяжелого газа, и тем больше будет затрудняться его диффузия вверх. При выделении со дна карьера легкого газа картина будет обратной. Механизм влияния тяжелого или легкого газа на интенсивность турбулентности аналогичен механизму влияния на нее охлаждения или прогрева воздуха. Газы, диффузия которых может изменять диффузионные свойства воздушного потока, называются диффузионно активными в отличие от диффузионно пассивных газов, диффузия которых не изменяет диффузионные свойства воздушного потока. Активными обычно являются газы, плотность которых значительно отличается от плотности воздуха.

Примеси, поступающие в атмосферу карьера в виде свободной струи (выхлопные газы автомашин, локомотивов и др.), распределяются в ее поперечном сечении неравномерно, причем максимальная концентрация находится на оси струи.

Эпюры распределения концентрации газов и величины температуры подобны. Они более широкие, чем эпюры скорости. Для струи свежего воздуха зависимость другая.

В.Н. Воронин предложил оценивать способность свободной струи насыщаться газом из окружающей среды, т.е. ее способность проветривать некоторое пространство от содержащегося в нем газа, так называемым коэффициентом турбулентной диффузии K, равным отношению средней концентрации газа в ядре постоянной массы $C_я$ к концентрации того же газа на границе свободной струи $C_{гр}$

$$K = \frac{C_я}{C_{гр}}.$$

Если в карьер поступает свободная струя, уже загрязненная газом, то естественно, что ее диффузионная способность будет иной, чем у чистой струи. Коэффициент турбулентной диффузии частично загрязненной свободной струи рассчитывается по формуле

$$K_з = K + (1 - K)\frac{C_0}{C_{гр}},$$

где K – коэффициент турбулентной диффузии чистой свободной струи; C_0 – концентрация газа в начальном сечении свободной струи.

8.2. Распространение газа, выделяемого точечным и линейным источниками

Источники выделения вредных газов в карьере могут быть:

– точечными (буровые станки, экскаваторы и т. п.);

– линейными (с обнаженных поверхностей угольных пластов, а также пород водоносных горизонтов, если воды насыщены газом; в определенной степени к линейным источникам можно отнести карьерные дороги, когда по ним с небольшими интервалами движутся автосамосвалы);

– распределенными по площади (очаги пожаров, взрывные работы).

Источники выделения вредных газов создают факелы газа в направлении ветра. На рис. 8.1 изображен факел газа от точечного источника, на рис. 8.2 – от линейных.

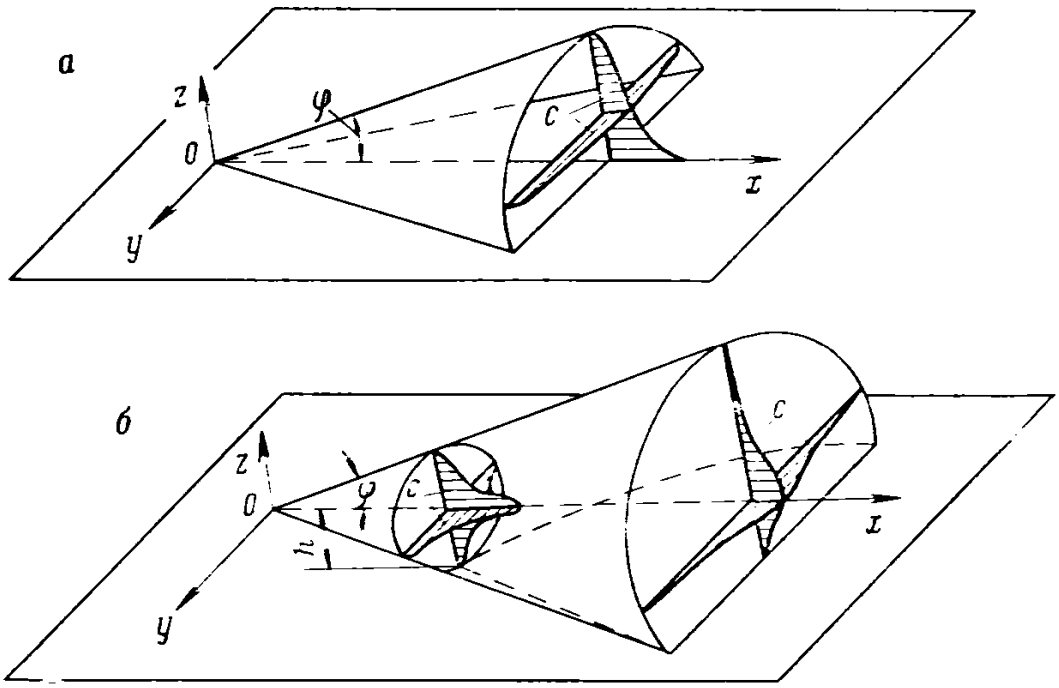


Рис. 8.1. Схема факела распространения газа от точечных источников: *а* – источник на поверхности уступа; *б* – источник на высоте *h* над поверхностью уступа

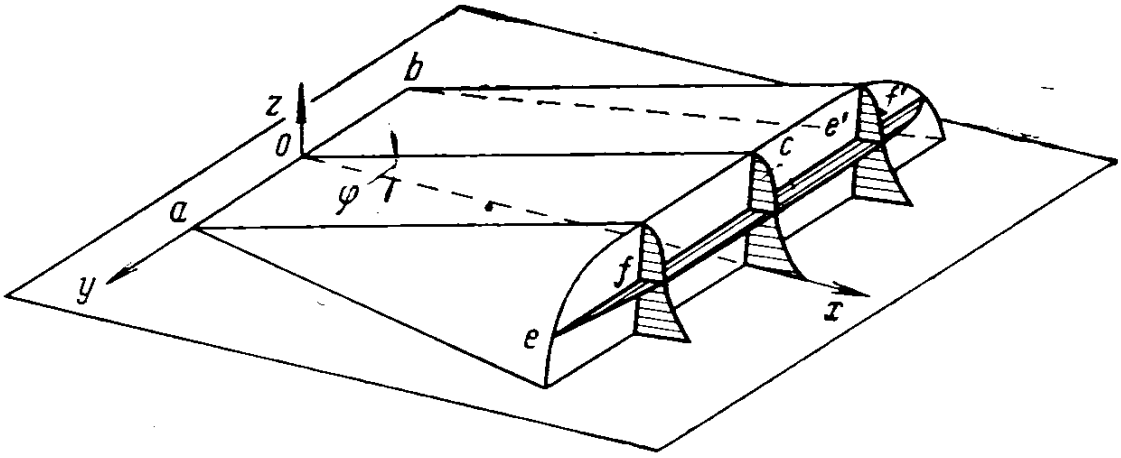


Рис. 8.2. Схема факела распространения газа от линейного источника на поверхности карьера

Угол раскрытия факела газа φ является основной характеристикой интен-

сивности рассеивания газа. Чем он больше, тем при прочих равных условиях интенсивнее рассеивается газ, тем меньше его концентрация в воздухе. Величина угла φ зависит от соотношения продольного (конвективного) и поперечного (турбулентного диффузионного) потоков газа. С увеличением скорости воздуха продольный поток газа растет быстрее, чем поперечный. В результате угол раскрытия факела уменьшается, как и концентрация газа в нем. Угол φ увеличивается с ростом турбулизации атмосферы (увеличивается поперечный поток газа).

Увеличение степени турбулизации на поверхности связана со срывом воздушного потока с верхней бровки карьера и с бровок уступов. Углы раскрытия свободной струи при рециркуляционной схеме проветривания выше, чем при прямоточной. Это также связано с большей турбулизацией воздуха при рециркуляцинной схеме. Для легких газов угол раскрытия факела больше, чем для тяжелых.

В результате расширения газового факела концентрация газа в нем резко уменьшается по мере удаления от источника

Концентрация газа на оси факела может быть определена по нижеприведенным формулам В.С. Никитина.

Концентрация газа в точке факела с координатами x, y, z для точечного источника (начало координат находится в месте расположения источника) определяется по формуле

$$c_m = \frac{k \cdot G}{x^2 \cdot \psi^2 \cdot U_u} \cdot \exp \frac{-6{,}3\sqrt{\left(y^2 + z^2\right)^{1/3}}}{\psi \cdot x^{1,3}} + c_0' .$$

Для линейного источника концентрация определяется по формуле

$$c_л = \frac{k \cdot G}{x \cdot \psi \cdot U_u \cdot L} \cdot \exp \frac{-3{,}9y^2}{\psi \cdot x^2} + c_0',$$

где G_m, $G_л$ – интенсивность источника газа (объем в единицу времени)соответственно точечным и линейным источниками, мг/с; U_u – скорость воздуха у источника, м/с; ψ – безразмерный параметр, характеризующий угол раскрытия газового факела и зависящий от турбулентности воздушного потока; L – длина линейного источника в направлении, перпендикулярном к направлению воздушного потока, м; k – безразмерный коэффициент (табл. 8.1.); c_0' – концентрация газа в воздухе, поступающем к источнику (так называемая «фоновая концентрация»), мг/м^3.

Безразмерный параметр ψ определяют по формуле

$$\psi = k' \frac{U_u}{U_{\min}} + b',$$

где k' – безразмерный коэффициент; U_{min} – минимальная скорость воздушного потока, при которой аэродинамические силы преобладают над термическими; b' – коэффициент, характеризующий турбулентность атмосферы, вызываемую действием термических сил.

Таблица 8.1

Величина коэффициента k

Вид источника	Место расположения источника	Схема проветривания	
		прямоточная	рециркуляционная
Точечный	на поверхности уступа	5,6	5,6
	над поверхностью уступа	3,0	3,6
Линейный	на поверхности уступа	2,7	3,0
	над поверхностью уступа	1,3	1,5

Значения коэффициентов k' и b' в зависимости от схемы проветривания и расположения источника выделения газа приведены в табл.8.2.

Таблица 8.2

Величина коэффициентов k' и b'

Схема проветривания карьера	Место расположения источника	k'	b'
Прямоточная	на поверхности уступа	0,045	0,22
	над поверхностью уступа	0,05	0,05
Рециркуляционная	на поверхности уступа	0,122	0,22
	над поверхностью уступа	0,07	0,05

8.3. Распространение газов при взрывных работах

Распространение газов, выбрасываемых в атмосферу карьера при производстве взрывных работ, происходит под действием кинетической энергии взрыва, разности температур газов ВВ и окружающего воздуха и воздушных потоков, циркулирующих во внутрикарьерном пространстве. Энергия взрыва формирует пылегазовое облако в течение первых 30…60 с. При этом газы и пыль выбрасываются на высоту до 250 м и более, вследствие чего при современных глубинах карьеров значительная часть пылегазового облака оказывается в зоне действия прямых воздушных потоков (вне зоны рециркуляции) и довольно быстро выносится из карьера.

Высота пылегазового облака зависит от расхода ВВ при взрыве и увеличивается с ростом последнего по экспоненциальной зависимости. Объем облака с увеличением расхода ВВ изменяется по зависимости, близкой к линейной.

В холодный период года диффузия оксида углерода, являющегося основной ядовитой компонентой газов ВВ, происходит значительно быстрее, а это зависит прежде всего от интенсивных восходящих конвективных потоков газа, которые образуются под действием мощных термических сил, развивающихся

вследствие значительной разности температур газов ВВ и окружающего воздуха.

При производстве взрыва объемом от 50 до 300 т энергия его приводит к тому, что содержание ядовитых газов на глубине карьера 100…160 м в пылегазовом облаке снижается до допустимых пределов через 5…20 мин.

Однако следует иметь в виду, что значительные количества газа, поступающие в атмосферу карьера из взорванной горной массы, сохраняются в течение нескольких часов. Так, оксид углерода обнаруживается на расстоянии до 100-200 м от места взрыва в течение 2…4 ч после взрыва. Газовыделение из взорванной горной массы со временем уменьшается, поэтому как процесс газовыделения, так и процесс диффузии газов от этого источника, является нестационарным.

8.4. Основные понятия и законы пылевой динамики

Пылевая динамика изучает движение в воздухе твердых частиц (пыли).

Частицы, взвешенные в воздухе, образуют совместно с ним аэродинамическую систему или аэрозоль. Особенностью аэрозоля является то, что его твердые частицы движутся практически независимо друг от друга. Поэтому движение аэрозоля можно изучать по движению отдельных частиц.

В движении пыли в воздухе имеется много общего с движением в воздухе газов. Подобно движению частиц газа движение пылинок слагается из движения среды и движения частиц относительно последней. Так же, как и при движении газа в воздухе, движение пылинок по отношению к воздуху определяется молекулярным движением воздушной среды, ее турбулентным движением и действием сил тяжести. Подобно диффундирующему газу пыль может изменять диффузионные свойства воздуха. Чем мельче пыль и чем меньше время ее нахождения в воздухе, тем больше совпадают процессы диффузии газа и пыли в воздухе. Поэтому вышеприведенные сведения о диффузии газов в атмосфере карьера в значительной степени характеризуют и распространение пыли в ней. Это относится к характеристикам газовых и пылевых факелов, распространяющихся от точечного и линейного источников, в частности, к закономерностям распространения концентрации газа и пыли в их поперечных сечениях и по длине, а также к характеристике пылегазового облака, образующегося после взрыва ВВ в карьере.

Однако движение пыли в воздухе имеет и свои особенности. Как уже отмечалось, они проявляются, прежде всего, во взаимной независимости движения отдельных пылинок. При движении пыли необходимо учитывать действие силы тяжести, приводящее к оседанию пылинок на твердые поверхности, расположенные ниже потока. В результате концентрация пыли в пылевом факеле, распространяющемся от источников пылевыделения, уменьшается быстрее, чем концентрация газа в газовом факеле. Явление оседания пылинок в потоке аэрозоля приводит к тому, что концентрация пыли в нижней части пылевого факела оказывается больше, чем в верхней, т. е. вертикальные эпюры концен-

траций пыли становятся несимметричными, а распределение газа в круглом сечении газового факела – симметричным. Действие силы тяжести приводит в конечном итоге к тому, что по истечении достаточно большого промежутка времени витания вся пыль выше некоторого определенного размера осаждается на почву. В воздухе остается лишь тонкая пыль с размером частиц в десятые доли микрона и менее, которая постоянно находится в броуновском движении.

Из сказанного выше следует, что в пылевой динамике карьеров большую роль играет фракционный состав пыли, который определяет, прежде всего, скорость оседания пыли, т. е. скорость изменения концентрации пыли по длине пылевого факела. Например, скорость оседания кварцевых пылинок в неподвижном воздухе при размере пылинок 100 мкм равна 47,15 мм/мин, при размере 1 мкм – 4,71 мм/мин, при размере 0,1 мкм – 2,8 мм/ч. При разных размерах частиц изменяется концентрация пыли. При более крупных и, следовательно, более тяжелых частицах концентрация пыли вдоль факела уменьшается быстрее вследствие быстрого оседания этих частиц по сравнению с мелкими частицами размером.

Выше отмечалось, что движение аэрозоля может изменять диффузионные свойства воздушного потока. Пылинки, являясь более инерционными, чем частицы воздуха, следуют за пульсационным движением последнего с некоторым отставанием (эффект «неполного увлечения»), вследствие чего происходит набегание пульсирующих объемов воздуха на пылинки. При этом набегающие объемы затормаживаются и, как следствие, уменьшается турбулентность (диффузионная способность) потока. Очевидно, что чем крупнее частица, тем в большей степени тормозятся набегающие на нее объемы воздуха, тем больше уменьшается турбулентность потока.

Движущиеся в воздухе пылинки практически не оказывают друг на друга взаимного влияния. Однако если частицы приближаются друг к другу на достаточно близкое расстояние, между ними появляются силы взаимодействия, в результате чего они соединяются в агрегат из двух (или нескольких) частиц. Это явление называется коагуляцией. Агрегаты коагуляции ведут себя как крупные частицы, они быстрее осаждаются и лучше задерживаются фильтрами. На этом явлении основаны некоторые способы борьбы с пылью (укрупнение частиц под действием акустических колебаний, смачивание их каплями воды и др.).

Наконец, движению воздуха над осевшими на твердую поверхность пылинками часто сопутствует явление сдувания пыли. Скорость ветра, при которой начинается сдувание и унос осевшей пыли, зависит от размера, материала и влажности пыли и может колебаться от 2 до 10 м/с и более на высоте 10-15 см от поверхности. Легче всего сдувается пыль бурого угля, труднее – железистых кварцитов. Перенос воздушным потоком осевших твердых частиц, начинающийся при минимальной скорости сдувания u_c, возрастает с увеличением скорости ветра u пропорционально $(u - u_c)^a$, где a – экспериментальный коэффициент, больший единицы (например, для снега $a \approx 2$).

Запыленность воздуха у источника пылеобразования зависит и от скорости ветра. Однако, изменение концентрации пыли у источника пылеобразования с изменением скорости ветра происходит не монотонно. Это связано с тем,

что средняя концентрация пыли в некотором поперечном сечении факела у источника пылеобразования зависит от трех одновременно протекающих процессов: разбавления пыли воздушным потоком, уноса пыли от источника пылеобразования и сдувания ее. В итоге с увеличением скорости ветра средняя концентрация пыли n в рассматриваемом поперечном сечении пылевого факела вначале уменьшается вследствие преобладания эффекта разбавления пыли при увеличении объемов проходящего у источников пылеобразования воздуха над эффектом дополнительного уноса более тяжелых фракций пыли с увеличением скорости ветра. При дальнейшем увеличении скорости действие этих двух эффектов взаимно уравновешивается, уменьшение запыленности прекращается: запыленность достигает минимального значения, соответствующего некоторой скорости ветра u_0. При увеличении скорости ветра более u_0 к эффекту уноса все более тяжелых фракций пыли от источника пылеобразования добавляется резко возрастающий эффект сдувания ранее осевшей пыли. В сумме эти два эффекта начинают преобладать над эффектом разбавления (также возрастающем с увеличением скорости ветра). В результате запыленность воздуха начинает возрастать.

При экспериментах было установлено, что минимальная запыленность воздуха у поверхности уступов бывает при скорости ветра 3…5 м/с.

8.5. Распространение пыли, выделяемой точечным и линейным источниками

Как уже отмечалось, распространение пыли от точечного и линейного источников в первом приближении можно характеризовать закономерностями, изложенными ранее для газа. При этом необходимо учитывать, что вследствие оседания частиц пыли под действием силы тяжести, концентрация ее вдоль оси пылевого факела будет убывать быстрее, чем концентрация газа, а в нижних частях пылевого факела по той же причине относительная концентрация пыли будет выше, чем относительная концентрация газа.

Концентрация пыли n (мг/м^3) в пылевом факеле может быть определена по выражениям:

– для точечного источника

$$n_m = \frac{k \cdot g_m}{x^2 \cdot \psi^2 \cdot u + k \cdot Q_u} \cdot \exp \frac{-6{,}3\sqrt{\left(y^2 + z^2\right)^{1{,}3}}}{\psi \cdot x^{1{,}3}} + n_0;$$

– для линейного источника

$$n_л = \frac{k \cdot g_л}{x \cdot \psi \cdot l \cdot u_{ср}} \cdot \exp \frac{-3{,}9 y^2}{x^2 \cdot \psi} + n_0,$$

где g_m и $g_л$ – интенсивность соответственно точечного и линейного источника выделения пыли, мг/с; k – коэффициент, зависящий от схемы проветривания карьера и расположения места выделения пыли относительно поверхности рабочей площадки уступа; x – расстояние от источника выделения пыли до попе-

речного сечения факела, в котором определяется концентрация пыли, м; y, z – координаты точки поперечного сечения факела, в которой определяется концентрация пыли, м; ψ – безразмерный параметр, характеризующий турбулентность потока у источника выделения пыли; u – скорость воздушного потока у источника выделения пыли, м/с; $u_{ср}$ – средняя скорость воздушного потока по длине линейного источника выделения пыли, м/с; Q_u – расход воздуха или других газов, выбрасываемых источником вместе с пылью, м^3/с; n_0 – запыленность воздуха, поступающего к источнику выделения пыли (фон), мг/м^3; l – длина линейного источника выделения пыли в направлении, перпендикулярном к направлению воздушного потока, м.

Коэффициенты k и ψ определяются экспериментально. Коэффициент k для точечного источника изменяется от 3 при его расположении над уступом до 5,7 при расположении на поверхности уступа; для линейного источника – соответственно от 1,3 до 3. Коэффициент ψ линейно растет с увеличением скорости воздушного потока; он больше при расположении источника выделения пыли на поверхности уступа, чем над ней, и изменяется от 0,1 до 0,8 при скорости ветра от 1 до 7 м/с.

Из приведенных выражений при $y = z = 0$ получаем закон распространения пыли по оси пылевого факела; он имеет гиперболический характер.

В поперечном сечении факела (x = const) концентрация пыли уменьшается от центра сечения к границам по экспоненте. Следует отметить, что приведенные выражения не учитывают асимметрию поля концентрации пыли в пылевом факеле, образующуюся вследствие действия сил тяжести и, следовательно, справедливы лишь для весьма мелких фракций.

8.6. Распространение пыли при взрывных работах

Взрывные работы являются источником пылеобразования, распределенным по некоторой площади. Рассматривая динамику аэрозоля в пылегазовом облаке, необходимо к отмеченным ранее закономерностям распространения последнего добавить фактор оседания пыли.

Из пылегазового облака пыль начинает оседать после его сформирования. По мере движения и развития облака ширина полосы оседания пыли увеличивается примерно по линейному закону. При этом количество осевшей пыли непостоянно: наибольшее ее количество сосредоточено вдоль оси полосы. Характерно, что распределение осевшей пыли по ширине полосы оседания подобно распределению концентраций газов и пыли в свободной струе и в пылегазовом факеле. Такое совпадение закономерно, так как количество осевшей пыли находится в прямой зависимости от запыленности воздуха, из которого оседает пыль. Этим же обстоятельством объясняется тот факт, что изменение количества осевшей пыли от места замера до места взрывания изображается кривой экспоненциального типа, тождественной кривой изменения концентрации газа и пыли вдоль газопылевого факела. Относительная концентрация пыли у поверх-

ности земли зависит от расстояния до места взрыва. Эксперименты подтверждают экспоненциальный характер изменения концентрации пыли вдоль пылегазового факела. Следует отметить, что с увеличением скорости ветра увеличивается количество переносимой пыли вдоль факела по сравнению с ее оседанием.

8.6.1. Анализ физических процессов выброса пылегазового облака

При массовых взрывах в карьерах зарождение и формирование пылегазового облака (ПГО) представляет собой высокоэнергетический, сложный и быстропротекающий процесс. После взрыва зарядов ВВ продукты детонации обладают высоким давлением и температурой, которые в процессе расширения изменяются до конечных нормальных значений. Характер этого процесса, в конечном итоге, определяет объемы загрязняющих веществ, рассеиваемых в атмосфере.

Процесс возникновения и развития ПГО при массовом взрыве можно разделить на три этапа.

Первый этап продолжительностью до 180 мс с момента начала процесса детонации, во время которого в атмосферу поступают сыпучие вещества забоек, выталкиваемые из скважин высоким давлением, и частично продукты детонации ВВ, фильтрующиеся через пористый материал забойки.

Второй этап зарождения и формирования ПГО продолжительностью с 180 до 800 мс, который наступает после разлома горного массива и характеризуется интенсивным выходом в атмосферу газообразных продуктов детонации и взрыва, а также пыли по всей границе раздробленного массива. Продолжается этот этап до момента выравнивания внутреннего давления в разрыхленном массиве с атмосферным давлением. В это время происходит наиболее интенсивное развитие ПГО за счёт его подпитки из очага взрыва.

Третий этап продолжительностью от 800 мс до 30 с характеризуется началом самостоятельной тепловой эволюции облака взрыва, его торможения и рассеивания в атмосфере.

На рис. 8.3 схематично представлен процесс формирования ПГО при массовом взрыве в карьере.

В стадии зарождения ПГО представляет собой условный объект с оболочкой высокой плотности и температуры, обладающий большим запасом кинетической и тепловой энергии, но пока имеет незначительные геометрические параметры. В стадии развития ПГО представляет собой условный объект с оболочкой в виде полидисперсной (пылегазовоздушной) среды незначительной плотности и с температурой, равной температуре окружающей среды, который при окончании своего развития теряет оболочку и имеет значительные геометрические параметры (до десятков млн. $м^3$).

Важнейшими параметрами ПГО является высота подъёма от поверхности земли и дальность его распространения в приземном слое атмосферы, поскольку они определяют степень загрязнения окружающей среды выброшенными в атмосферу продуктами взрыва.

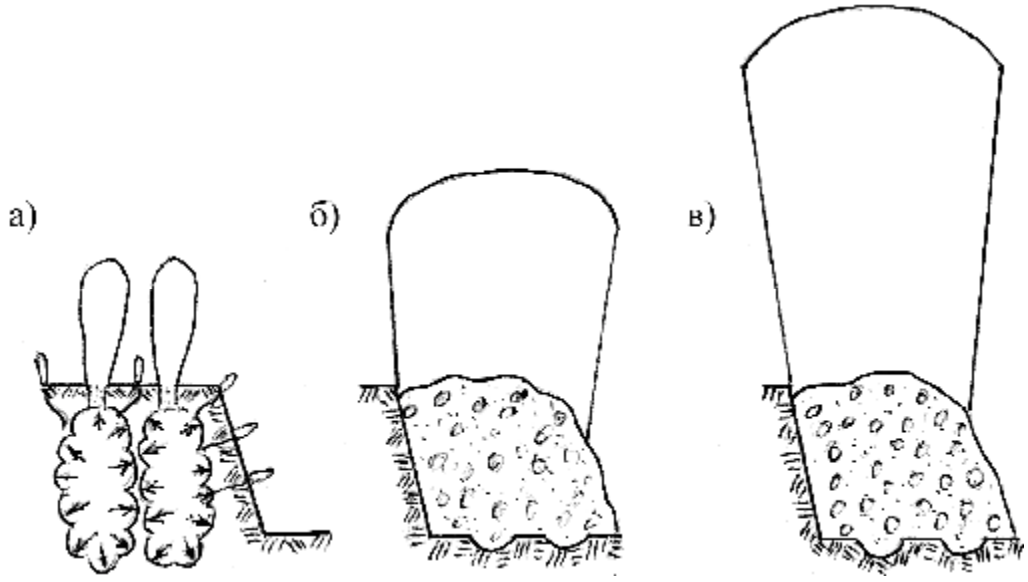


Рис. 8.3. Схемы процесса формирования пылегазового облака при массовом взрыве в карьере: а, б, в – соответственно через 180, 800, 30000 мс.

Выходящие из скважины остатки продуктов детонации обладают высокой начальной скоростью движения (динамический фактор) и температурой, превышающей температуру окружающей среды (тепловой фактор).

Начальная скорость и температура остатков продуктов взрыва формируют ПГО определённой высоты. Время действия динамического фактора исчисляется долями секунды, а теплового – минутами. Промышленные исследования показали, что через 55-65 с ПГО начинает терять свои чёткие очертания и через несколько минут скорость развития становится минимальной и соответствует скорости ветра у поверхности карьера.

Результаты исследований общей высоты подъёма ПГО и дальности его распространения имеют разноречивый характер. Так, в некоторых работах утверждается, что ПГО при массовом взрыве достигает высоты до 1,6 км и распространяется на расстояния 8-12 км и более. В других работах показано, что крупные фракции пыли интенсивно выпадают из пылегазового облака через 60-120 с после взрыва, а газы и мелкие частицы пыли в зависимости от скорости ветра распространяются на различные расстояния от его эпицентра (до 2-3 км и более). Установлено также, что под действием теплового фактора ПГО получает в среднем 50%-ное приращение высоты своего подъёма, а время действия фактора достигает нескольких минут. Исследованиями установлено, что за первые $t_1 = 800$ мс под действием энергии взрыва ПГО выбрасывается на высоту $h_1 = 100\text{-}120$ м. При этом скорость движения всех компонентов облака составляет $u_1 = h_1/t_1 = 125\text{-}150$ м/с. Причем период формирования эпицентров не зависит от метеорологических параметров атмосферы. Принимая во внимание приведенные данные, важно определится с высотой подъёма ПГО на третьем этапе его развития. Поэтому проанализируем процесс его образования.

Из второго закона Ньютона следует, что элементарное изменение количества движения равно элементарному импульсу силы. В результате, частица под

действием сил инерции после выброса её из скважины продуктами детонации ВВ движется вверх, обладая количеством движения $m\vartheta$, где m – масса частицы кг, ϑ – скорость ее движения, м/с. Препятствует движению частицы сила тяжести и сила сопротивления воздуха

$$F_m = mg,$$

$$F_c = 0{,}5 \cdot \rho_в \cdot \xi \cdot \vartheta^2 \cdot S_M,$$

где $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; ξ – коэффициент сопротивления, который зависит от числа Рейнольдса; ϑ – скорость движения пылевой частицы, м/с; S_M – миделево (поперечное) сечение частицы, м^2.

Таким образом

$$d(m\vartheta) = Fdt,$$

или

$$\frac{d(m\vartheta)}{dt} = F_T + F_C.$$

Подставим в последнее выражение значения действующих на частицу сил, получим

$$m\frac{d\vartheta}{dt} = mg + 0{,}5\rho_в\xi\vartheta^2 S_M,$$

откуда

$$\vartheta = \left(\frac{m \cdot (a-g)}{0{,}5 \cdot \rho_в \cdot \xi \cdot S_M}\right)^{0{,}5}.$$

Очевидно, если частицы выбрасываются из скважины в один и тот же момент времени, то более тяжёлые (крупные) частицы, имея больше количества движения, подымаются выше, чем мелкие. Частицы прекратят движение вверх, когда их замедление сравняется с ускорением земного тяготения.

При разработке проекта массового взрыва определяется контур взрываемого участка, который по площади уступа имеет ширину B и длину L (рис.8.4).

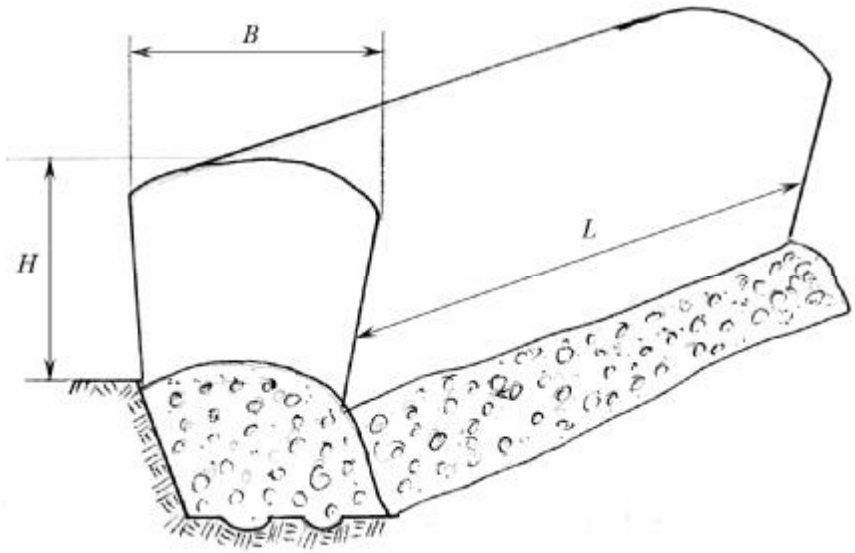


Рис. 8.4. Геометрические параметры пылегазового облака в стадии зарождения

После производства взрыва в первые 800 мс ПГО выбрасывается на высоту H и имеет в стадии зарождения температуру около 2500°С. Таким образом, в результате первого этапа зарождения ПГО образуется исходный объём раскалённых газов и пыли

$$V_1 = B \cdot L \cdot H.$$

В течение 280-800 мс заканчивается формирование теплового и пылевого эпицентров ПГО и начинается формирование эжекционных потоков и подъём облака по вертикали.

Установлено, что количество вредных газов от применяемого при массовых взрывах в Кривбассе украинита – ПП-2Б составляет 24,3 л/кг ВВ в пересчёте на СО. Эти газы в период зарождения ПГО занимают объём

$$V_г = 24{,}3 \cdot Q, \text{ дм}^3, \qquad (8.1)$$

где Q – масса заряда ВВ при массовом взрыве, кг.

В исходный объём ПГО, кроме взрывных газов, поступает и атмосферный воздух в количестве

$$V_в = V_1 - V_г. \qquad (8.2)$$

Таким образом, в исходный объём ПГО поступают взрывные газы в объёме $V_г$, температура которых равна $t_г$, и атмосферный воздух в объёме $V_в$, температура которого равна $t_в$. Определим массу этой смеси и её температуру.

Масса смеси газов равна сумме масс газов, составляющих смесь

$$m = m_1 + m_2 + \ldots + m_i = \rho_1 \cdot V_{г.1} + \rho_2 \cdot V_{г.2} + \ldots + \rho_i \cdot V_{г.i}, \qquad (8.3)$$

где $m_i = \rho_i \cdot V_{г.i}$ – масса i-го газа смеси, кг; i = 1; 2; …; n – порядковый номер газа смеси; n – количество газов, составляющих газовую смесь; ρ_i – плотность i-го газа смеси, кг/м^3; $V_{г.i}$ – объём i-го газа в смеси, м^3.

Так как газы при смешивании не совершают внешней работы, то внутренняя энергия смеси газов, согласно первому закону термодинамики, равна сумме внутренних энергий отдельных газов до смешивания:

$$U = U_1 + U_2 + \ + U_n = U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n = \sum_{i=1}^{n} U_{i\ i}, \qquad (8.4)$$

где U – внутренняя энергия смеси газов, Дж; U_i – внутренняя энергия i-го газа, Дж.

Внутренняя энергия газа определяется по выражению:

$$U = m \cdot C_p \cdot T, \qquad (8.5)$$

где m – масса газа, кг; C_p – удельная массовая теплоёмкость газа при постоянном давлении, Дж/кг·К; T – температура газа, К.

Тогда

$$mC_pT = m_1C_{p1}T_1 + m_2C_{p2}T_2 + \ldots + m_nC_{pn}T_n$$

или

$$C_pT = q_1C_{p1}T_1 + q_2C_{p2}T_2 + \ldots + q_nC_{pn}T_n, \qquad (8.6)$$

где C_p – массовая теплоёмкость смеси газов, Дж/кг К; T – температура смеси газов, К; $q_i = \dfrac{m_i}{m}$ – массовые доли газов, составляющих газовую смесь.

Теплоёмкость смеси газов определяют по выражению:

$$C_p = q_1C_{p1} + q_2C_{p2} + ... + q_nC_{pn} = \sum_{i=1}^{n} q_iC_{pi}\,.$$

С его учетом выражение (8.6) примет вид:

$$T\cdot(q_1C_{p1} + q_2C_{p2} + ... + q_nC_{pn}) = q_1C_{p1}T_1 + q_2C_{p2}T_2 + ... + q_nC_{pn}T_n.$$

Откуда находим температуру смеси газов на первом этапе зарождения пылегазового облака:

$$T = \frac{q_1C_{p1}T_1 + q_2C_{p2}T_2 + ... + q_nC_{pn}T_n}{q_1C_{p1} + q_2C_{p2} + ... + q_nC_{pn}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_iC_{pi}T_i}{\sum_{i=1}^{n} q_iC_{pi}}\,. \qquad (8.7)$$

Таким образом, по истечению 800 мс после взрыва и смешивания раскалённых газов, пыли и атмосферного воздуха ПГО будет иметь объём V_1 и температуру T, которую можно определить по выражению (8.7).

Дальнейшее расширение ПГО происходит под воздействием тепловых и инерционных процессов при постоянном давлении, равном атмосферному, так как давление в расширяющихся продуктах детонации и в воздухе быстро выравнивается со скоростью распространения звука в данном газе.

Для упрощения анализа процесса принимаем условия, при которых отсутствует боковой ветер и атмосферные осадки, а также не учитываем влияние электромагнитных полей и температурной стратификации атмосферы. При расширении продуктов детонации будет уменьшаться их плотность, закон изменения которой можно установить из следующих соображений.

Запишем уравнение состояния газов для момента образования первичного облака:

$$p_1 = \rho_1 RT_1,$$

где p_1 – давление газов детонации, Н/м^2; ρ_1 – плотность смеси газов, кг/м^3; R – удельная газовая постоянная; T_1 – температура смеси газов, К.

При расширении облака эти параметры будут изменяться и для момента окончания процесса расширения уравнение состояния можно записать в следующем виде:

$$p_2 = \rho_2 RT_2\,.$$

Разделим эти выражения друг на друга:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{T_1}{T_2}.$$

Отсюда $\rho_2 = \rho_1\frac{p_2T_1}{p_1T_2}$. Заменяя величины ρ_1 и ρ_2 обратными $\rho_1 = \frac{1}{V_1}$; $\rho_2 = \frac{1}{V_2}$, получаем

$$V_2 = V_1\frac{p_1}{p_2}\frac{T_2}{T_1}, \qquad (8.8)$$

где V_2 – объём облака по окончанию процесса расширения, м^3; p_2 – давление

внутри облака, равное атмосферному, Па; T_2 – температура смеси газов облака после остывания, равная температуре окружающей среды, К.

Выражение (8.8) можно записать как

$$\frac{V_2}{V_1} = K\frac{T_2}{T_1},$$

где $K = \frac{p_1}{p_2}$ – коэффициент пропорциональности, равный соотношению давлений в начале и конце процесса расширения облака.

Таким образом, при остывании и расширении пылегазового облака изменение его объёма пропорционально изменению его температуры:

$$\Delta V = K\Delta T .$$

В процессе расширения ПГО от исходного объёма V_1, формирование которого заканчивается по истечению, примерно, 800 мс после взрывания ВВ, до конечного объёма V_2, формирование которого заканчивается по истечении примерно 30 с после взрыва, в него, в результате эжекционных процессов и диффузии, поступает атмосферный воздух в количестве, равном разности этих объёмов:

$$V_в = V_2 - V_1, \qquad (8.9)$$

где $V_в$ – количество атмосферного воздуха, поступающего в ПГО в результате эжекционных процессов, м^3.

Конечный объём ПГО при отсутствии бокового ветра можно определить по известным количествам поступивших в него взрывных газов и их концентрации в конце процесса расширения. При этом, в соответствии с данными измерения концентрации взрывных газов, приведенными в работе, их максимальная концентрация после взрыва составляет: *NO, NO*$_2$ – 6-8 мг/м^3; *CO* – 245-260 мг/м^3. С учетом объемов этих газов, конечный объём ПГО можно определить из выражения

$$V_2 = \frac{V_Г}{\sum_{i=1}^{n} c_i}\cdot 100 \text{, м}^3, \qquad (8.10)$$

где $\sum_{i=1}^{n} c_i$ – суммарная концентрация взрывных газов в ПГО, %.

Дисперсный состав пыли образовавшихся облаков весьма разнообразен. Причем аэровзвеси и крупнодисперсная пыль оседают сразу после взрыва, а тонкодисперсная увлекается восходящим потоком газовоздушной смеси. Процесс её осаждения происходит дифференцировано в зависимости от массы и размера частиц.

8.6.2. Метод расчёта высоты подъёма пылевого облака с учётом дисперсности частиц

Высота подъёма ПГО существенно влияет на приземные концентрации пыли, которые определяют ее опасность для здоровья населения, а также даль-

ность распространения выброса, граница влияния которого на почву ограничена поступлением ее в размере до 1 ПДК пыли. Согласно расчётам приземные концентрации обратно пропорциональны квадрату высоты источника выброса. Таким образом, чем выше поднимется пылевое облако, тем меньше приземные концентрации. Зато существенно возрастает площадь рассеивания пыли. Задача же состоит в том, чтобы уменьшить площадь воздействия пылевого облака, сократив ее в идеале до размеров санитарно-защитной зоны (СЗЗ) карьера. С этой позиции важно создавать способы снижения высоты газопылевого выброса при взрывах. При этом необходимо располагать методом расчета этой высоты, с учетом параметров взрыва и условий карьера, а также дисперсного состава выбрасываемой в атмосферу пыли.

Количество пыли, выбрасываемой в атмосферу при массовых взрывах в железорудных карьерах, изменяется в широких пределах и зависит от многих факторов. Важнейшим из них является удельный расход взрывчатых веществ (ВВ) на единицу объема взрываемой горной массы. По результатам исследований установлено, что удельный выброс пыли при применении грамонита составляет 0,143-0,260 кг/кг ВВ, при применении украинита – 0,106-0,218 кг/кг ВВ, при применении анемикса – 0,100-0,150 кг/кг ВВ. Начальная концентрация пыли в облаке после взрыва украинита колеблется в пределах 1320-1400 мг/м^3. Энергией взрыва пылевые частицы поднимаются на различную высоту. При этом наблюдается более интенсивное оседание крупных и тяжелых частиц в сравнении с мелкими и легкими. Влияние температурной стратификации атмосферы приводит к тому, что в полидисперсном облаке частицы при рассеивании распределяются по высоте согласно размерам (при равной плотности вещества), облако расслаивается на относительно монодисперсные пылевые слои. От высоты расположения частиц каждого размера этих слоев будет зависеть характер их рассеивания в атмосфере под действием ветра и диффузии, приземные концентрации пыли, интенсивность её оседания на почву и, в конечном итоге, экологическая опасность железорудной карьерной пыли для окружающей среды и здоровья населения, проживающего на прилегающих территориях. Поэтому при исследовании параметров пылевой динамики после массовых взрывов необходимо установить характер формирования пылегазового облака и, в частности, определения высоты подъёма пылевых частиц, выбрасываемых при массовых взрывах в атмосферу, с учетом влияния разных факторов, включая дисперсность частиц и плотность вещества железорудной пыли.

Вначале рассматривались известные аналитические зависимости, которые позволяют рассчитать высоту подъема пылегазового облака после массовых взрывов. Исследованиями установлены зависимости для определения высоты его подъема после взрыва относительно уровня, принятого за начальный. Особенностью представленных соотношений является то, что с их помощью можно определить высоту подъёма ПГО в целом. При решении же вопросов пылеподавления облака, в частности орошением, или в случае прогнозирования рассеивания пыли под действием ветра, важно знать дисперсное распределение частиц пыли по высоте облака. Поэтому необходимо оценить высоту подъема частиц различного размера под действием теплового фактора.

Для анализа поведения твердых аэрозольных частиц в ПГО после массового взрыва рассмотрим действующие на них силы. Предположим, что на частицу, кроме силы тяжести, действуют лишь силы гидродинамической природы. Для упрощения решения задачи будем считать, что все частицы пыли имеют форму шара, подъём частиц происходит при отсутствии бокового ветра, а диффузия в горизонтальном направлении пренебрежимо мала.

Итак, продукты детонации скважинных зарядов и образовавшаяся при взрыве пыль под действием теплового напора начинают движение вверх с начальной скоростью ϑ_0. Газовый поток взрыва в процессе формирования облака движется под действием инерционных сил и сил теплового напора со скоростью *u*. Вследствие явления проскальзывания, пылевые частицы движутся относительно потока газа с меньшей скоростью ϑ. При этом, скорости потока газов и частиц изменяются во времени, как показано на рис. 8.5. Поэтому относительная скорость пылевой частицы составит

$$\omega = u - \vartheta .$$

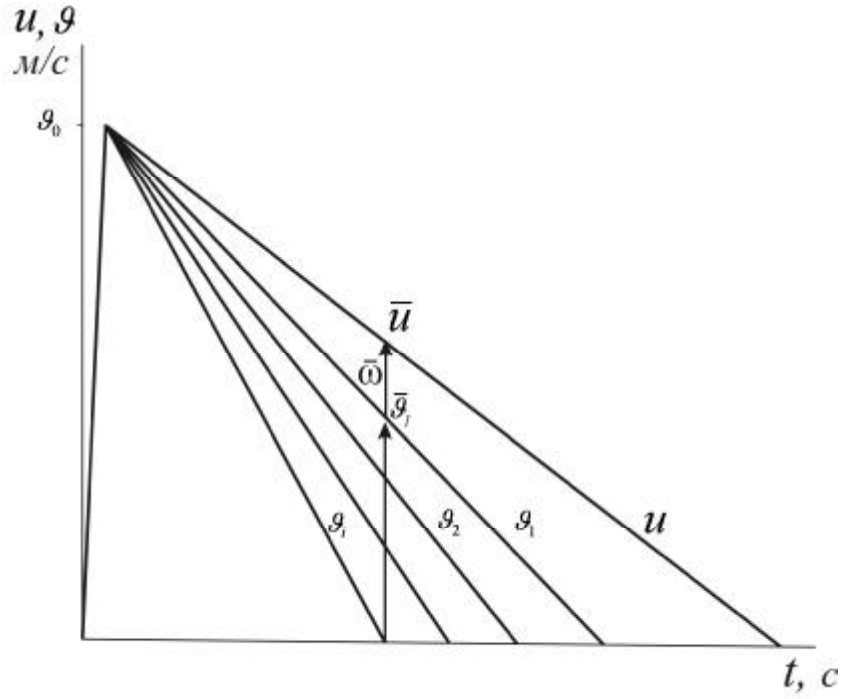


Рис. 8.5. Характер изменения скорости движения взрывных газов (*u*) и пылевых частиц (ϑ_i) в пылегазовом облаке после массового взрыва

Дальнейшее движение частицы будет замедляться за счёт воздействия на неё силы сопротивления движению (силы вязкости) и силы тяжести. По мере остывания продуктов детонации тепловой напор будет снижаться, что вызывает уменьшение скорости движения пылевой частицы и пропорциональной ей силы сопротивления. В конечном итоге разнонаправленные силы, воздействующие на пылевую частицу, сравняются и частица прекратит движение вверх, достигнув максимальной высоты подъёма. Определим эту высоту.

Уравнение движения частицы в соответствии со вторым законом Ньютона запишется в виде

$$m \cdot a = \sum F , \qquad (8.11)$$

где m – масса частицы, кг; a – ускорение движения частицы, м/с^2; $\sum F$ – сумма сил, действующих на частицу, Н.

Проанализируем силы, действующие на пылевую частицу (рис.8.6).

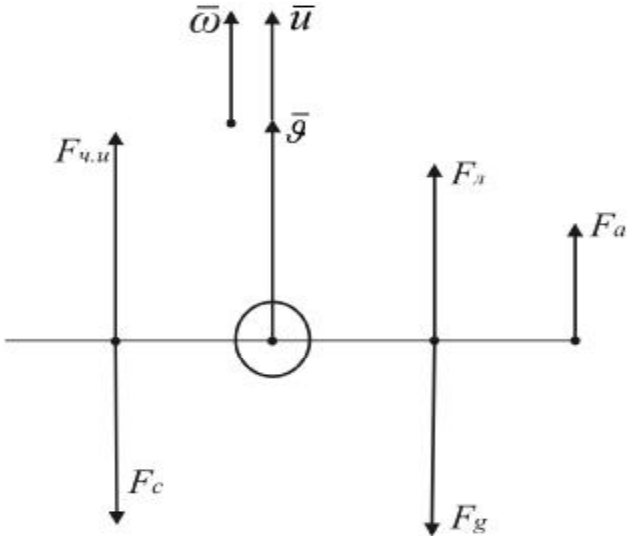


Рис. 8.6. Схема определения сил, действующих на пылевую частицу

1. Сила аэродинамического сопротивления воздуха обозначена как F_c, Н. Она определяется по выражению

$$F_c = 0{,}5 \cdot \rho_г \cdot \xi \cdot \vartheta^2 \cdot S_м , \qquad (8.12)$$

где $S_м$ − площадь поперечного (миделевого) сечения сферической частицы, м^2; ξ − коэффициент сопротивления, который зависит от числа Рейнольда частицы. Для стоксовских частиц $\xi = \dfrac{24}{\mathrm{Re}}$. Для крупных тяжелых частиц и их высоких относительных скоростей можно воспользоваться формулой Клячко:

$$\xi = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}},$$

здесь

$$\mathrm{Re} = \frac{\vartheta \cdot d}{\nu} = \frac{\rho_в \cdot \vartheta \cdot d_ч}{\mu},$$

где ν − кинематический коэффициент вязкости воздуха, м^2/с; μ=18,2·10^{-6} Па·с – динамическая вязкость воздуха, $d_ч$ – диаметр пылевой частицы, м; $\rho_в$ − плотность воздуха, кг/м^3.

После подстановки значений и преобразований выражение (8.12) для стоксовских частиц примет вид

$$F_c = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_ч \cdot \vartheta .$$

Направлена сила сопротивления противоположно вектору скорости движения частицы.

Поскольку начальная скорость частицы равна $\vartheta = \vartheta_0$, а конечная после ее

остановки в воздухе – $\vartheta = 0$, будем считать для простоты среднюю скорость частицы, равной $\vartheta_0 / 2$. С учетом этого, выражение (8.12) примет вид:

$$F_c = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_ч \cdot \frac{\vartheta_0}{2}. \quad (8.13)$$

2. По направлению вектора ускорения g на частицу действует сила тяжести

$$F_g = mg. \quad (8.14)$$

Она направлена против вектора скорости движения частицы.

3. Под действием разности температур продуктов детонации ВВ (T_1) и наружного воздуха (T_2) возникает конвективный поток (рис. 8.7).

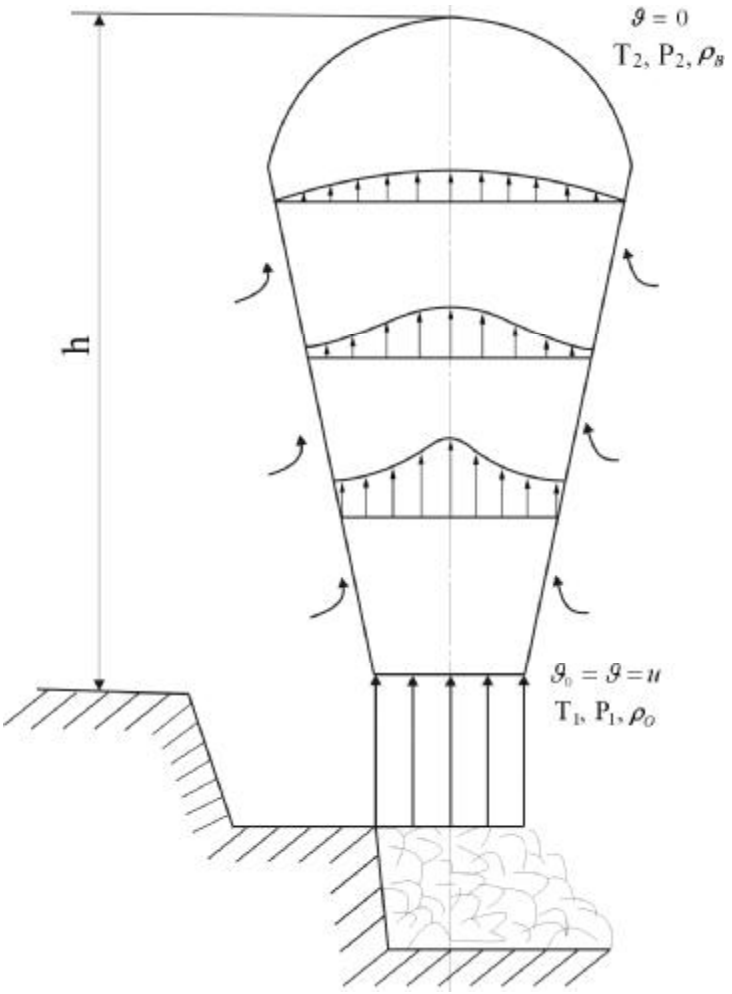


Рис. 8.7. Схема формирования пылегазового облака при массовом взрыве

При этом движущийся поток воздействует на пылевые частицы, вызывая их перемещение вверх за счет силы лобового давления $F_л$. Величина этой силы совпадает с направлением вектора скорости частицы и зависит от скорости конвекции, которая определятся плотностью газов детонации и окружающего воздуха, а также от поперечного сечения частицы:

$$F_л = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \cdot S_м, \quad (8.15)$$

где $\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{p_1}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_1}$ − плотность продуктов детонации скважинных зарядов ВВ, Н/м^3. Здесь ρ_0 − плотность продуктов детонации при нормальных условиях, Н/м^3; p_1 − статическое давление выбросов продуктов детонации, Па; T_1 − температура выбросов продуктов детонации, К; $\rho_2 = \rho_в \cdot \frac{P_2}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_2}$ − плотность атмосферного воздуха, кг/м^3, при атмосферном давлении p_2 и температуре T_2; $\rho_в$ − плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3; h – высота подъёма пылегазового облака, м; $S_м = \frac{\pi \cdot d_ч^2}{4}$ − поперечное (миделево) сечение пылевой частицы, м^2.

Таким образом, выражение (8.15) можно записать как

$$F_л = \frac{g \cdot \pi \cdot d_ч^2}{4} \cdot \left(\rho_в \cdot \frac{p_2}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_2} - \rho_0 \cdot \frac{p_1}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T_1} \right) \cdot h. \qquad (8.16)$$

Поскольку в продуктах детонации статическое давление быстро становится равным атмосферному, то можно считать, что $p_a = p_1 = p_2$. В этом случае выражение (8.16) примет вид

$$F_л = \frac{\pi \cdot d_ч^2 \cdot g}{4} \cdot \frac{293 p_a}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \left(\frac{\rho_в}{T_2} - \frac{\rho_0}{T_1} \right) \cdot h. \qquad (8.17)$$

Если пренебречь силами инерции, вызванными изменением скорости газа, силами инерции вытесненного газа, силами сопротивления при изменении ускорения движения частицы, действием силы Архимеда, поскольку плотность газа на три порядка меньше плотности железорудной пыли, то уравнение движения частицы (8.11) в этом случае запишется в виде:

$$ma = F_л - F_c - F_g. \qquad (8.18)$$

В момент прекращения движения частицы выражение (8.18) примет вид:

$$ma = F_л - F_c - F_g = 0,$$

или

$$F_л = F_c + F_g. \qquad (8.19)$$

Подставив в него значения сил, определенных выше, получим

$$\frac{\pi \cdot d_ч^2 \cdot g}{4} \frac{293 \cdot p_a}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \left(\frac{\rho_в}{T_2} - \frac{\rho_0}{T_1} \right) \cdot h = \frac{3}{2} \pi \cdot \mu \cdot d_ч \cdot \vartheta_0 + m \cdot g.$$

После исключения массы сферической частицы m получим

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{g}{\rho_ч \cdot d_ч} \cdot \frac{293 p_a}{1{,}013 \cdot 10^5} \cdot \left(\frac{\rho_в}{T_2} - \frac{\rho_0}{T_1} \right) \cdot h = \frac{18 \cdot \mu}{\rho_ч \cdot d_ч^2} \cdot \frac{\vartheta_0}{2} + g.$$

Раскроем значение скорости выхода продуктов детонации ϑ_0 и введём значение времени релаксации, т.е. времени, в течение которого частица затормозится в воздухе или, наоборот, разгонится от нуля до скорости потока, если

её туда поместить, – $\tau = \dfrac{\rho_ч \cdot d_ч^2}{18 \cdot \mu}$. Получим выражение:

$$\frac{3g}{2\rho_ч d_x}\frac{293p_a}{1{,}013\cdot 10^5}\left(\frac{\rho_в}{T_2}-\frac{\rho_0}{T_1}\right)h=\frac{M\upsilon_Д}{2\tau}\left[\frac{1}{0{,}33+(l_З/l_{ВВ})(\rho_з/\rho_{ВВ})}\right]^{1/2}+g.$$

Из него находим высоту подъёма пылевой частицы:

$$h=\frac{\dfrac{M\upsilon_Д}{2\tau}\left[\dfrac{1}{0{,}33+(l_З/l_{ВВ})(\rho_З/\rho_{ВВ})}\right]^{1/2}+g}{\dfrac{3g}{2\rho_ч d_ч}\dfrac{293p_a}{1{,}013\cdot 10^5}\left(\dfrac{\rho_a}{T_2}-\dfrac{\rho_0}{T_1}\right)}. \qquad (8.20)$$

Выражение (8.20) позволяет рассчитать высоту подъёма пылевой частицы в ПГО, образовавшемся после массового взрыва. Отличием формулы от известных является то, что она учитывает размеры (диаметры) частиц пыли, плотность их вещества, а, кроме того, параметры скважинных зарядов, атмосферное давление и температуру воздуха, температуру продуктов детонации ВВ и начальную скорость выхода остатков продуктов детонации, которая, в свою очередь, зависит от мощности взрыва и типа применяемого ВВ.

Для дальнейшего использования формулы (8.20) необходим анализ дисперсного состава аэрозоля в пылегазовом облаке по априорным данным. В качестве исходного распределения частиц в пылевом облаке в 20 м от блока без применения средств пылегазоподавления взято распределение, приведенное в работах Тыщука В.Ю. (табл.8.3).

Таблица 8.3

Дисперсный состав (массовое содержание в %) пылевых частиц, образующихся после массовых взрывов в карьерах

Наименование показателя	Значение показателя						
Диаметр частиц, мкм	< 1,4	1,4-4,2	4,2-10	10-15	15-30	30-45	45-100
Средний диаметр фракции, мкм	1	3	7	13	23	38	73
Массовое содержание, %	10,67	11,24	12,46	14,15	15,88	17,37	18,24

Как видим, доля наиболее опасной для биоты пыли с размером частиц от 1 до 10 мкм составляет более 30% от общей массы выбрасываемой пыли. Оставшуюся часть составляет крупная пыль, которая довольно быстро оседает в атмосфере, причем в самом карьере или в пределах его СЗЗ.

Расчет высоты подъема пылевых частиц среднего диаметра исследуемых фракций выполнены по формуле (8.20) при массовом взрыве мощностью 500 т “Украинита – ПП-1” в скважинах диаметром 250 мм и глубиной 18 м. При этом исходим из положения о независимом действии динамического и теплового факторов. Как известно, под действием динамического фактора (давления продуктов детонации ВВ) пылевые частицы выбрасываются из скважины на высоту до 120 м. Причём это облако является полидисперсным, а пылевые частицы

всех фракций распространены по всему объёму облака.

Далее под действием теплового фактора частицы начинают подниматься с разной высоты до верхней границы облака. При этом мелкодисперсная пыль как наиболее лёгкая поднимается на наибольшую высоту, а тяжёлая крупнодисперсная пыль окажется на минимальной высоте. В результате, при развитии ПГО под действием теплового фактора при отсутствии ветра происходит распределение частиц фракций по высоте.

Проведём расчёт верхних и нижних границ распределения условных облаков со средними диаметрами частиц, исследуемых фракций пыли, которые в средней части облака перекрывают друг друга. В расчете используем исходные данные, характерные для указанного выше взрыва:

– коэффициент, учитывающий взаимодействие метаемого тела со стенками взрываемого горного массива $M = 5{,}3 \cdot 10^{-3}$;

– скорость детонации ВВ в заряде $\upsilon_Д = 4500$ м/с;

– длина заряда ВВ в скважине $l_{ВВ} = 8$ м;

– длина забойки в скважине $l_З = 8$ м;

– плотность забойки $\rho_З = 4000$ кг/м^3;

– плотность ВВ $\rho_{ВВ} = 1550$ кг/м^3;

– плотность железорудной пыли $\rho_ч = 4000$ кг/м^3;

– динамический коэффициент вязкости воздуха $\mu = 18{,}2 \cdot 10^{-6}$ Па·с;

– атмосферное давление $p_a = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па;

– температура продуктов детонации ВВ в первичном облаке $T_1 = 596$ К , вычисленное по выражению (8.7);

– температура атмосферного воздуха $T_2 = 293$ К;

– плотность атмосферного воздуха при нормальных условиях $\rho_a = 1{,}2$ кг/м^3;

– плотность продуктов детонации при нормальных условиях $\rho_0 = 1{,}8$ кг/м^3.

Результаты расчётов высоты подъёма условных облаков со средним диаметром частиц исследуемых фракций пыли при отсутствии ветра под действием теплового фактора представлены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Результаты расчетов для средних диаметров фракций пыли

Средний диаметр фракции, мкм	1	3	7	13	23	38	73
Верхняя граница подъёма, м	603,8	281,3	189,1	157,2	41,0	132,7	126,6
Нижняя граница подъёма, м	483,8	161,3	69,1	37,2	21,0	12,7	6,6

Наглядно распределение пылевых фракций в облаке при отсутствии ветра представлено на рис. 8.8.

При отсутствии ветра пылевые частицы на прилегающие территории не рассеиваются и осаждаются в карьерном пространстве. При наличии ветра пылевое облако выносится из карьера под действием ветровых потоков и вследст-

вие осаждения пылевых частиц загрязняет прилегающие территории.

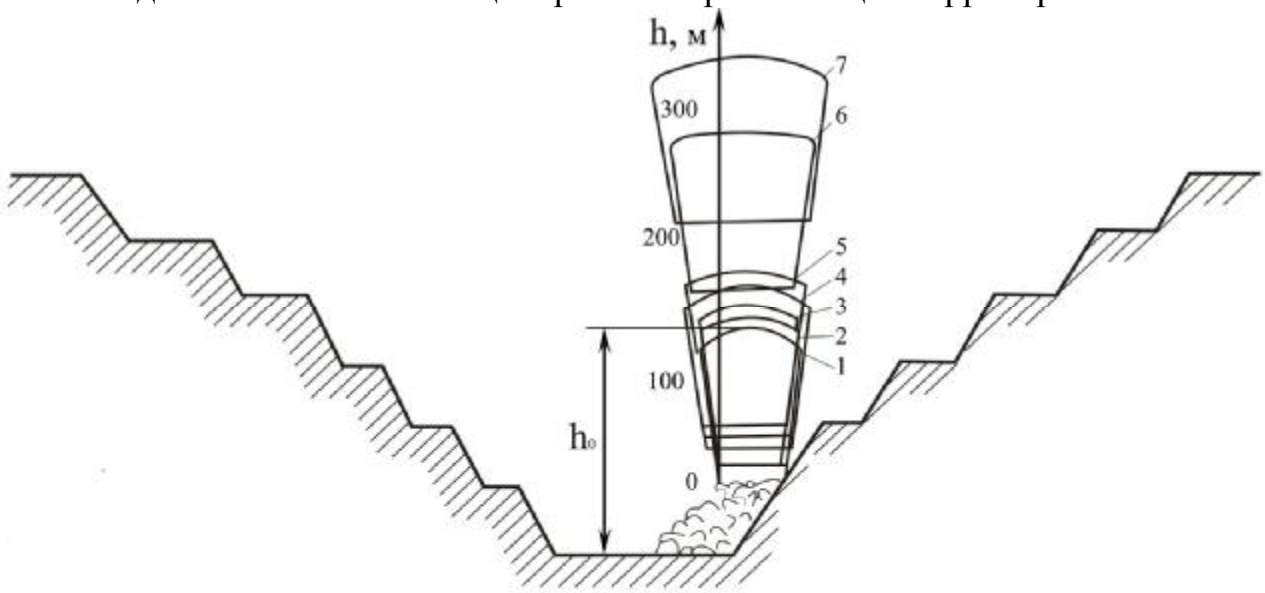


Рис. 8.8. Распределение пылевых фракций в облаке в зависимости от среднего диаметра частиц: 1 – 73 мкм; 2 – 38 мкм; 3 – 23 мкм; 4 – 13 мкм; 5 – 7 мкм; 6 – 3 мкм; 7 – 1 мкм

8.6.3. Расчёт скорости осаждения пылевых частиц из пылегазового облака

При решении вопросов борьбы с пылегазовым облаком, снижения загрязнения атмосферы и прилегающих территорий важно знать скорости осаждения аэрозольных частиц на земную поверхность. Проанализируем этот процесс для железорудной пыли с учетом известных классических положений Стокса о движение частиц в жидкости или газе под действием силы тяжести, а также с учетом параметров частиц ПГО, образующегося при массовом взрыве в карьере.

Как показано, в ПГО сразу после взрыва в результате воздействия динамического и термического факторов пыль движется вверх. Причём высота подъёма частиц зависит от их диаметра и плотности вещества. Далее при равновесии сил, вызывающих движение частицы вверх, и сил сопротивления движению пылевая частица останавливается. Затем начинается ее движение вниз (осаждение) под действием силы тяжести

$$F_g = mg,$$

где m – масса частицы, кг; g – ускорение земной тяжести, м/с^2.

Противодействует оседанию частицы выталкивающая сила Архимеда

$$F_A = \rho_0 V g,$$

где ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3; V – объём частицы, м^3.

Так же оседанию частицы препятствует сила трения среды, которая при ламинарном режиме движения среды пропорциональна скорости движения частицы (рис.8.9). Сила трения среды может быть выражена как

$$F_{mp} = K\vartheta,$$

где K – коэффициент сопротивления, Н·с/м, ϑ – скорость осаждения пылевой частицы, м/с.

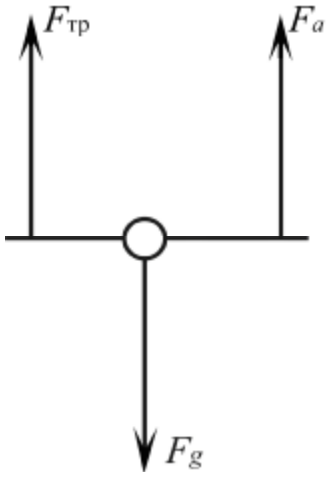


Рис.8.9. Силы, действующие на частицу при её осаждении

Аналитическая зависимость для определения K была впервые получена Стоксом путем совместного решения уравнений движения газа (Навье-Стокса) и сплошности среды:

$$\frac{Du}{dt} = F - \frac{1}{\rho} gradP + \frac{\mu}{\rho} \bar{V}^2 \vartheta; \qquad (8.21)$$

$$diV\vartheta = 0. \qquad (8.22)$$

При этом было получено выражение в виде

$$K = 3\pi\mu d,$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с; d – диаметр пылевой частицы, м, при допущениях:

– сфера обтекается безграничным однородным потоком вязкой жидкости;

– обтекание медленное, стационарное, поэтому инерционными членами в уравнении можно пренебречь и учесть только силы давления и трения;

– объёмные силы отсутствуют.

Проанализируем, как оседает частица в воздухе. Вначале она движется ускорено, а затем сила трения среды F_{mp} уравновешивает силу седиментации $F_g - F_A$:

$$F_{mp} = F_g - F_A. \qquad (8.23)$$

После подстановки значений сил выражение (8.23) примет вид:

$$3\pi\mu d\vartheta = mg - \rho_0 Vg.$$

Выразим массу и объём частицы как $m = \rho \cdot V$, а $V = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$, тогда выражение (8.23) примет вид:

$$3\pi\mu d\vartheta = \frac{\rho g \pi d^3}{6} - \frac{\rho_B g \pi d^3}{6}.$$

Откуда после преобразований получим:

$$\vartheta = \frac{g\rho d^2}{18\mu}. \qquad (8.24)$$

Выражение (8.24) известно как формула Стокса для определения скорости осаждения пылевых частиц в воздухе под действием сил гравитации. Следует отметить, что ввиду принятых допущений область её применения ограничивается как по числу Рейнольдса, так и по размеру частиц. Хорошее совпадение формула (8.24) даёт только при числах Рейнольдса – $\mathrm{Re} = \frac{\rho_0 \vartheta d}{\mu} < 1$.

С ростом числа Re сила сопротивления среды становится пропорциональной квадрату скорости и определяется выражением

$$F_c = \xi 0{,}5 \rho_0 \vartheta^2 \pi r^2,$$

где $\xi = f(\mathrm{Re})$ – коэффициент сопротивления частицы, определяемый в общем случае по экспериментальным данным и зависящий от режима обтекания; r – радиус пылевой частицы, м.

Весь диапазон значений Re обычно делят на несколько областей, в пределах которых зависимость $\xi = f(\mathrm{Re})$ можно аппроксимировать простыми формулами. Причем при расчётах удобно пользоваться формулой вида $\xi = \frac{A}{\mathrm{Re}^n}$, где коэффициенты A и n в зависимости от числа Re определяются по табл.8.5.

Таблица 8.5

Значения коэффициентов A и n для разных Re

Re	A	n
0,1	24,0	1,0
0,1 – 1	26,9	0,95
1 – 10	26,5	0,8
$10 – 10^2$	16,8	0,6
$10^2 – 10^3$	5,8	0,37

Скорость осаждения пылевой частицы можно определить и по методу Лященко. При этом скорость осаждения выражают через число Рейнольдса $\vartheta = \frac{\mathrm{Re}\,\mu}{\rho_0 d}$ и подставляют в уравнение осаждения частицы $F_g = F_c$ или

$$\frac{1}{6}\pi d^3(\rho - \rho_0)g = \frac{1}{2}\xi\rho_0 \frac{\mathrm{Re}^2\,\mu^2}{\rho_0^2 d^2}\frac{\pi d^2}{4}.$$

Это уравнение сводится к виду

$$\xi\,\mathrm{Re}^2 = \frac{4}{3}\frac{d^3\rho_0^2(\rho - \rho_0)g}{\mu^2},$$

где выражение

$$\frac{d^3\rho_0^2(\rho-\rho_0)g}{\mu^2}=Ar, \qquad (8.25)$$

т.е. представляет собой число Архимеда.

В этом случае $Ar=\frac{3}{4}\xi\,\mathrm{Re}^2$. Далее можно выразить число Рейнольдса для двух предельных случаев:

– для стоксовской области $\mathrm{Re}<1$; $\xi=\frac{24}{\mathrm{Re}}$: $\mathrm{Re}=\frac{Ar}{18}$;

– для области $\mathrm{Re}>10^4$; $\xi=0{,}45$: $\mathrm{Re}=\frac{\sqrt{Ar}}{0{,}6}$.

В целом для всего диапазона чисел Рейнольдса достаточную для ориентировочных расчётов точность даёт приближённая формула Тодеса:

$$\mathrm{Re}=\frac{Ar}{18+0{,}61\sqrt{Ar}}. \qquad (8.26)$$

В результате вышеизложенного расчёт скорости осаждения пылевых частиц в гравитационном поле осуществляют в следующем порядке:

1) рассчитывают скорость осаждения по формуле Стокса (8.24);
2) проверяют полученную скорость на число Рейнольдса;
3) если $\mathrm{Re}>1$, то формулу Стокса применять нельзя, так как получен ошибочный результат;
4) определяют число Архимеда по выражению (8.25);
5) по известному числу Архимеда определяют число Рейнольдса по формуле Тодеса (8.26);
6) определяют скорость осаждения частицы через число Рейнольдса по выражению $\vartheta=\frac{\mathrm{Re}\,\mu}{\rho_0 d}$.

Для оценки загрязнения прилегающих к карьеру территорий с учетом дисперсности железорудной пыли важно иметь достаточно точные значения скорости осаждения пылевых частиц в воздухе. В табл. 8.6 представлены результаты расчётов скорости осаждения пылевых частиц железной руды исследуемых диаметров.

В результате этих исследований можно сделать вывод о том, что при осаждении частиц железорудной пыли в гравитационном поле до диаметров в 50 мкм процесс происходит в стоксовской области. Осаждение более крупных частиц находится в надстоксовской области.

На рис. 8.10 представлен график изменения скорости осаждения частиц железорудной пыли в зависимости от их диаметра в стоксовской и надстоксовской областях.

В заключение отметим, что в облаке железорудной пыли частицы размерами до 10 мкм составляют до 30%. Они имеют скорость осаждения не более 2 см/с.

Таблица 8.6

Скорость осаждения железорудной пыли в гравитационном поле

Диаметр частиц, м	$\vartheta_{oc} = \frac{g\rho d^2}{18\mu}$	$\mathrm{Re} = \frac{\rho_o \vartheta d}{\mu}$	$Ar = \frac{d^3 \rho_0^2 (\rho - \rho_0) g}{\mu^2}$	$\mathrm{Re} = \frac{Ar}{18 + 0{,}61\sqrt{Ar}}$	$\vartheta_{oc} = \frac{\mathrm{Re}\mu}{\rho_0 d}$
$1 \cdot 10^{-6}$	$0{,}012 \cdot 10^{-2}$	$0{,}0008 \cdot 10^{-2}$	$0{,}17 \cdot 10^{-3}$	$0{,}00094 \cdot 10^{-2}$	$0{,}013 \cdot 10^{-2}$
$3 \cdot 10^{-6}$	$0{,}108 \cdot 10^{-2}$	$0{,}021 \cdot 10^{-2}$	$1{,}53 \cdot 10^{-3}$	$0{,}0085 \cdot 10^{-2}$	$0{,}129 \cdot 10^{-2}$
$7 \cdot 10^{-6}$	$0{,}587 \cdot 10^{-2}$	$0{,}27 \cdot 10^{-2}$	0,0584	0,324·10-2	$0{,}702 \cdot 10^{-2}$
$13 \cdot 10^{-6}$	$2{,}02 \cdot 10^{-2}$	$1{,}73 \cdot 10^{-2}$	0,374	0,0208	$2{,}42 \cdot 10^{-2}$
$23 \cdot 10^{-6}$	$6{,}33 \cdot 10^{-2}$	$10{,}98 \cdot 10^{-2}$	2,073	0,115	$7{,}58 \cdot 10^{-2}$
$38 \cdot 10^{-6}$	$17{,}28 \cdot 10^{-2}$	$43{,}28 \cdot 10^{-2}$	9,350	0,519	$20{,}71 \cdot 10^{-2}$
$50 \cdot 10^{-6}$	$29{,}56 \cdot 10^{-2}$	$98{,}71 \cdot 10^{-2}$	21,290	1,183	$35{,}88 \cdot 10^{-2}$
$73 \cdot 10^{-6}$	$63{,}79 \cdot 10^{-2}$	$306{,}9 \cdot 10^{-2}$	66,29	$289{,}2 \cdot 10^{-2}$	$58{,}8 \cdot 10^{-2}$

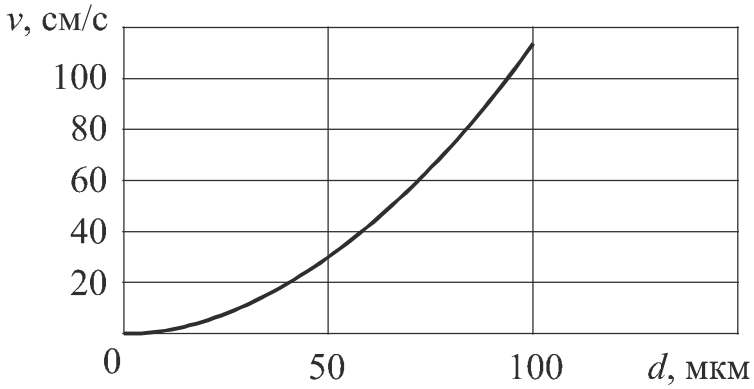


Рис. 8.10. Скорость осаждения железорудной пыли в зависимости от диаметра частиц

8.6.4. Оценка параметров рассеивания пылевого облака при массовых взрывах в карьерах

Оценка интенсивности выноса пыли приведена на примере карьеров Криворожского железорудного бассейна. Здесь открытым способом добычу руды ведут 9 карьерами, которые являются структурными подразделениями горно-обогатительных комбинатов (табл. 8.7).

Условно по величине отношения глубины карьера к его размерам в плане H/L различают три их типа:

1) $H/L \leq 0{,}1$ – мелкие;
2) $0{,}1 < H/L < 0{,}2$ – средней глубины;
3) $H/L \geq 0{,}2$ – глубокие.

Таким образом, как видно из таблицы, карьеры Кривбасса относятся к глубоким и средней глубины, для которых характерна рециркуляционная схема проветривания. Для этой схемы структура воздушных потоков в нижней части карьера имеет обратное (рециркуляционное) движение воздуха по отношению к направлению ветра.

Таблица 8.7

Действующие карьеры Кривбасса

№ п/п	Название карьера	Глубина карьера H, м	Размер в плане L, м	$\frac{H}{L}$
1	ОАО СевГОК:			
	Анновский карьер	500	4700	0,11
	Первомайский карьер	650	300	0,22
2	ОАО ЦГОК:			
	Карьер №1	500	4290	0,12
	Карьер №2	300	2700	0,11
	Карьер №3	545	1700	0,32
3	ПАО «АкселорМиттал Кривой Рог»:			
	Карьер №2-бис	415	2200	0,19
	Карьер №3	500	2550	0,20
4	Карьер ОАО ЮГОКа	615	3000	0,21
5	Карьер ОАО ИнГОКа	615	3600	0,17

Рециркуляционная схема движения воздуха получает развитие при углах откоса подветренного борта карьера более 20° (рис. 8.11). При этом всегда часть карьера находится в зоне действия прямых потоков, совпадающих с направлением ветра на поверхности.

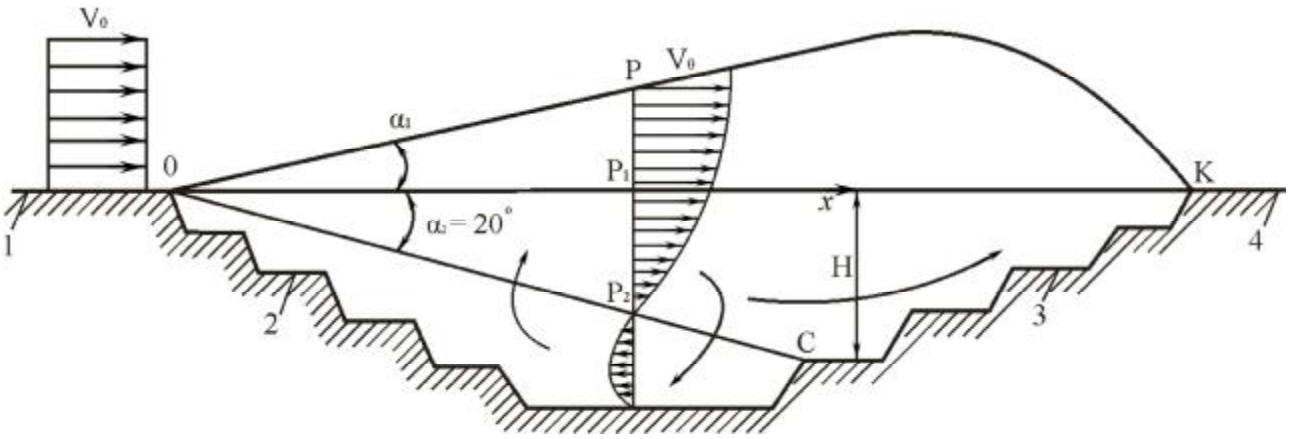


Рис. 8.11. Рециркуляционная структура воздушного потока в карьере: 1 – наветренная сторона карьера; 2 – подветренный борт; 3 – наветренный борт; 4 – подветренная сторона карьера

Деформация потока в пределах карьера происходит за счёт его расширения и образования пограничного слоя между линиями ОР и $ОР_2$ с попутным направлением движения воздуха. Вдоль плоскости, проходящей по линии ОРК, скорость потока равна скорости ветра за пределами карьера. Вдоль плоскости, проходящей через линию ОС и которая имеет угол наклона α_2=15-20°, скорость движения потока воздуха равна нулю. Ниже этой плоскости наблюдается

движение воздуха, обратное направлению ветра. В результате этого между попутным и обратным потоками возникает циркуляция воздуха. При этом средняя скорость в зоне обратных потоков обычно не превышает $0{,}3 \cdot U_0$.

В связи с этим распределением потоков воздуха в карьере вынос пылегазового облака после массового взрыва зависит от места ведения взрывных работ по отношению к направлению ветра.

Основополагающим фактором, влияющим на вынос и рассеивания пылевого облака после массовых взрывов, является направление и скорость ветра. Скорость ветра для условий карьера изменяется по глубине и достаточно точно определяется из выражения:

$$U_z = \beta_1 U_0 \frac{\ln(H - z) - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0}, \qquad (8.27)$$

где U_z – скорость ветрового потока на глубине z от поверхности карьера, м/с; $\beta_1 = 0{,}6\text{-}0{,}67$ – коэффициент, учитывающий изменение скорости ветра U_0 на поверхности z_0 при движении в пределах карьера вдоль оси x; H – глубина карьера, м.

Если взрывные работы ведутся в наветренном боку на глубине h на расстоянии x от начала подветренного борта карьера выше точки C, то в этом случае $\alpha_2 < 20°$, а отношение $\frac{h}{x} < \text{tg}20° < 0{,}364$. Пылевое облако при этом будет находиться в зоне прямоточного режима движения потока воздуха, и все частицы будут выноситься ветровым потоком из зоны ведения взрывных работ и, в зависимости от их дисперсности, будут оседать на наветренном борту (крупные) или выноситься за пределы карьера (мелкие). При ведении взрывных работ в наветренном борту ниже точки C или в подветренном борту при отношении $\frac{h}{x} \geq 0{,}364$ часть пылевого облака (около 30%) попадет в зону рециркуляции и с карьера ветровыми потоками не выносится.

Поскольку территория Криворожского бассейна размещена в глубине равнинного пространства Евразии, то воздушные массы достигают его в значительной мере трансформированными. Климатические показатели этого региона следующие:

- среднее атмосферное давление по г. Кривой Рог летом – 753,7 мм.рт.ст.; зимой – 788,1 мм.рт.ст.;
- среднегодовая температура воздуха: +8,5°С;
- средняя температура самого холодного месяца (январь): – 5,1°С;
- средняя температура самого тёплого месяца (июль): + 22,0°С;
- средняя температура в 13 часов самого тёплого месяца (июль): + 28,8°С;
- длительность периода с положительной температурой: 170-180 дней.

По данным многолетних наблюдений в среднем за год преобладают ветры северного и северо-восточного направлений. Часто наблюдаются ветры восточного и северо-западного направлений. В холодное время года преобладают ветры северо-восточного и восточного направлений. Реже всех наблюдается

южный ветер. В табл. 8.8 приведены средние значения скорости ветра по месяцам и за год.

Таблица 8.8

Средняя месячная и годовая скорость ветра

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Скорость, м/с	5,6	5,9	5,8	5,3	5,0	4,4	4,1	4,1	4,2	4,6	5,2	5,6	5,0

Средняя годовая скорость ветра составляет 5,0 м/с. Наибольшие скорости ветра наблюдаются в зимние месяцы и весной, наименьшие – в летние месяцы и вначале осени. В течение суток наибольшие скорости ветра приходятся на дневные часы, наименьшие – на ночные. В солнечные дни, в ночные часы скорость ветра снижается до нуля, поэтому для оценки суточного хода скорости ветра можно принять коэффициент неравномерности – 0,5.

С учётом того положения, что в настоящее время глубина карьеров Кривбасса в среднем превысила 300 м, можно сделать вывод о том, что за пределы карьера под действием ветра выносится, как правило, тонкодисперсная пыль с диаметром частиц в 1-10 мкм (рис. 8.12). Для определения диаметра частиц грубодисперсной пыли, которые могут быть вынесены из карьерного пространства вертикальной составляющей воздушного потока, необходимо провести дополнительные расчёты.

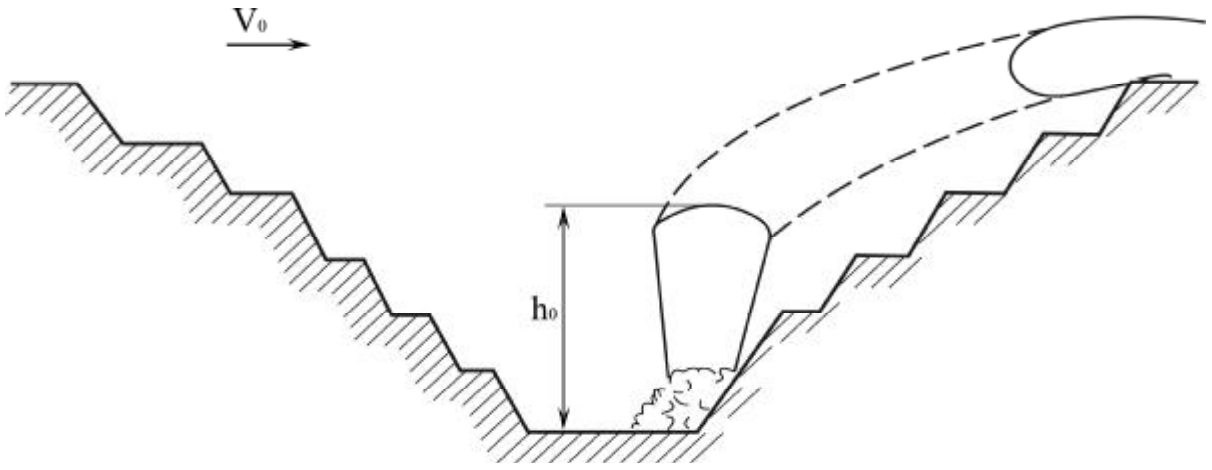


Рис. 8.12. Схема формирования пылевого облака при наличии ветра

Под действием бокового ветра пылевые частицы, вынесенные за границы карьера, рассеиваются в окружающей среде. Движение взвешенных частиц в турбулентном потоке воздуха (при средней скорости ветра для Кривбасса – 5 м/с) характеризуется разной интенсивностью в разных направлениях. При теоретическом анализе движения пылевых частиц в турбулентном потоке воздуха обычно принимаются следующие предположения.

1. Диаметр частиц d мал по сравнению с масштабом пульсаций воздуха. Этому условию удовлетворяют частицы любой дисперсности, а именно: высокодисперсные (d < 0,5…1 мкм); тонкодисперсные (0,5…1 < d < 10…20 мкм); и грубодисперсные (10…20 < d < 100…200 мкм).

2. Обтекание частиц пульсационными потоками имеют вязкий характер, то есть Re < 1.
3. Частицы сферичны по форме.
4. Гидродинамическое сопротивление движению частиц при Re < 1 описывается в первом приближении линейным законом Стокса $F_c = 3\pi\mu \mathrm{d}\vartheta$.
5. Среднее расстояние между частицами, определяемое по формуле $s_m = 80d\sqrt[3]{\frac{\rho_ч}{C_M}}$ ($\rho_ч$ – плотность частицы, г/см^3; C_M – их массовая концентрация, г/м^3), велико по сравнению с их размерами, поэтому они не стесняют друг друга в ходе взаимных перемещений, не соударяются и не коагулируют друг с другом.
6. Электростатические и другие силы не гидродинамической природы в турбулентном аэродисперсном потоке отсутствуют.

В этом случае дифференциальное уравнение движения отдельно взятой частицы в турбулентной среде имеет вид:

$$\frac{\pi}{6}d^3\frac{d\bar{u}}{dt} = 3\pi\mu d(\bar{u}-\bar{\vartheta}) - \frac{\pi}{6}d^3(\rho_ч-\rho_Г)\frac{\mathrm{d}\bar{u}}{dt} - \frac{1}{2}\cdot\frac{\pi}{6}d^3\rho_Г\left(\frac{d\bar{u}}{dt}-\frac{d\bar{\vartheta}}{dt}\right)+$$
$$+\frac{3}{2}d^2\sqrt{\pi\rho_Г\mu}\cdot\int_{e_0}^{e}\frac{\frac{\mathrm{d}\bar{u}}{\mathrm{dt}'}-\frac{d\bar{\vartheta}}{dt'}}{\sqrt{t-t'}}dt'+\frac{\pi}{6}d^3\rho_ч\mathrm{g}, \qquad (8.28)$$

где $\bar{\vartheta}$, $\bar{u}$ – векторы скоростей частицы и газа; t, t' – рассматриваемый и предшествующий моменты времени.

Здесь сила инерции частицы, вызванная изменением её скорости, в левой части равенства уравновешивается стоящей в правой части суммой сил сопротивления и инерции, вызванной изменением скорости газа, инерции вытесненного газа, сопротивления при внезапном ускорении за промежуток времени $(t-t')$ и силой тяжести.

При Re < 1 интегральным членом в уравнении (8.28) можно пренебречь, так как сопротивление среды при внезапном ускорении мало отличается от стоксовского. Третий член в правой части этого уравнения также пренебрежимо мал, так как плотность газа на три порядка меньше плотности вещества пылевой частицы.

После упрощений и деления левой и правой части уравнения на массу частицы $m = 1/6\cdot\pi\cdot d^3\cdot\rho_ч$ уравнение (8.28) примет вид:

$$\frac{d\bar{\vartheta}}{dt}+\frac{18\mu\bar{\vartheta}}{\rho_ч d^2} = \frac{18\mu\bar{u}}{\rho_ч \mathrm{d}^2}+\bar{g}. \qquad (8.29)$$

Уравнение (8.29) с учётом того, что $\frac{\rho d^2}{18\mu} = \tau$ (время релаксации частицы,

с), примет вид:

$$\frac{d\bar{\vartheta}}{dt}+\frac{\bar{\vartheta}}{\tau}=\frac{\bar{u}}{\tau}+\bar{g}. \qquad (8.30)$$

В прямоугольных координатах за ось *x* примем продольное направление, за ось z – вертикальное направление и за ось *y* – поперечное направление.

Уравнение (8.30) описывает движение пылевой частицы в продольном направлении под действием скоростного напора движущего потока воздуха и в вертикальном направлении (вниз) под действием силы тяжести.

Рассмотрим первоначально оседание пылевой частицы под действием силы тяжести, внесённой в движущийся со скоростью *u* поток воздуха.

Процесс оседания пылевых частиц под действием силы тяжести в турбулентном потоке складывается из двух процессов:

1) непрерывного оседания частиц к низу внутри несущих их пульсационных молей;
2) беспорядочного по направлению, частоте и амплитуде движения частиц со спусками и подъёмами вместе с несущими их пульсационными молями.

В этом случае решение уравнения (8.30) при начальных условиях $t = 0$, $\vartheta = 0$ имеет вид:

$$\vartheta = \vartheta_c(1-e^{-t/\tau}),$$

где $\vartheta_c = \tau \cdot g$ – конечная скорость оседания пылевых частиц, м/с.

Установлено, что при малых числах Рейнольдса (Re < 1), когда сила сопротивления среды движению частицы связана со скоростью обтекания линейной зависимостью $F_c = K \cdot \vartheta_c$, среднее за период пульсаций значение этой силы получается равным силе сопротивления неподвижной среды. Отсюда следует, что скорость оседания стоксовских частиц в пульсирующем потоке остаётся равной скорости свободного оседания пылевых частиц в неподвижном потоке.

Вторичным интегрированием определим пройденный частицей путь

$$z = \vartheta_c t - \vartheta_c \tau(1-e^{-t/\tau}). \qquad (8.31)$$

Выражение (8.31) позволяет рассчитать путь, пройденный частицей за время *t* под действием силы тяжести. Если положение частицы относительно уровня поверхности осаждения известно, то из выражения (8.31) можно определить время осаждения частицы. Так с верхней или нижней границы вторичного пылевого облака, имеющей высоту относительно дна карьера $h_в$, время осаждения частиц можно определить из выражения:

$$h_E = \vartheta_c t - \vartheta_c \tau(1-e^{-t/\tau}). \qquad (8.32)$$

Значение $e^{-t/\tau} << 1$ при любых значениях *t* и им можно пренебречь. В этом случае

$$t = \frac{h_E + \vartheta_c \tau}{\vartheta_c}. \qquad (8.33)$$

В горизонтальном направлении пылевая частица движется под действием силы скоростного давления ветра F_c. В этом случае в выражении (8.30) следует заменить *g* на *F*/*m* и оно примет вид:

$$\frac{d\bar{\vartheta}}{dt}+\frac{\bar{\vartheta}}{\tau}=\frac{\bar{u}}{\tau}+\frac{\bar{F}}{m}$$

или

$$\tau\frac{d\bar{\vartheta}}{dt}+\bar{\vartheta}=\bar{u}+\frac{\tau}{m}\bar{F}_c\,. \tag{8.34}$$

Выражение (8.34) представляет собой уравнение движения пылевой частицы в горизонтальном направлении под действием ветра, записанном в векторной форме. Правую часть этого выражения можно заменить одним вектором $\bar{u}_0$. Скалярная форма уравнения движения частицы по оси *x* будет иметь вид:

$$\tau\frac{d\vartheta_x}{dt}+\vartheta_x=u_0. \tag{8.35}$$

После интегрирования этого выражения при известной скорости частицы ϑ_{x0} в момент времени $t=0$ получим выражение для определения скорости частицы в горизонтальном направлении:

$$\vartheta_x=u_0+(\vartheta_{x0}-u_0)e^{-t/\tau}\,. \tag{8.36}$$

Вторичное интегрирование выражения (8.36) даёт определения пути, пройденного пылевой частицей под действием ветра в горизонтальном направлении:

$$x=u_0t+\tau(\vartheta_{x0}-\mathrm{u}_0)(1-\mathrm{e}^{-\mathrm{t}/\tau}).$$

Так как экспоненциальная функция в этом выражении с ростом *t* быстро убывает и уже при $t=7\tau$ близка к нулю, то путь частицы можно определить из выражения

$$x=u_0t+\tau(\vartheta_{x0}-u_0)\,.$$

Поскольку начальная скорость частицы в горизонтальном направлении $\vartheta_{x0}=0$, то это выражение упростится:

$$x=u_0(t-\tau).$$

После подстановки значений u_0 и τ выражение для расчёта пути пылевой частицей, пройденной под действием ветра за время *t*, примет вид:

$$x=\left(u+\frac{\tau}{m}F_c\right)(t-\tau)=ut+\frac{\rho d^2}{18\mu}u\left(\frac{3}{4}\frac{ut}{d}-\frac{\rho ud}{24\mu}-1\right), \tag{8.37}$$

где *x* – пройденный пылевой частицей путь под действием ветра, м; *u* – скорость ветра, м; ρ – плотность частицы, кг/м^3; *d* – диаметр частицы, м; μ = 18,2·10^{-6} Па·с – динамическая вязкость воздуха.

При турбулентном режиме каждая составляющая скорости пульсаций характеризуется отношением её среднеквадратичного значения к средней скорости ветра:

$$I_x=\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\bar{u}};\quad \mathrm{I_y}=\frac{\sqrt{\overline{\vartheta'^2}}}{\bar{u}};\quad \mathrm{I_z}=\frac{\sqrt{\overline{\omega'^2}}}{\bar{u}}; \tag{8.38}$$

$$I = \left[\frac{1}{3}\left(\overline{u}'^2 + \overline{\vartheta}'^2 + \overline{\omega}'^2\right)\right] / \overline{u},$$

где в $\overline{u}'^2, \overline{\vartheta}'^2, \overline{\omega}'^2$ представлены все частотные составляющие скорости пульсаций.

Исследованиями воздушных потоков установлено, что в тихой атмосфере I ≈ 0,2%, а в подвижной атмосфере – 3-5%. Из этого можно сделать вывод о том, что поток запылённого воздуха при своём движении под действием ветра расширяется в поперечном направлении со скоростью до 5% от скорости ветра. Кроме этого установлено, что пульсационная скорость вдоль распространения пылевого облака практически не влияет на распределение концентраций пыли и форму облака. Далее будут рассмотрены вопросы распространения пылевого облака в условиях изотропной турбулентности. Строение атмосферы, близкое к изотропной турбулентности, может иметь место при температурном градиенте, близком к изотермическому.

Таким образом, расчёт геометрических параметров зоны рассеивания пылевого облака при массовом взрыве под действием ветра при известной высоте его подъёма, дисперсном и минералогическом составе без учёта температурной стратификации атмосферы, электромагнитных полей и других факторов может быть проведен в следующей последовательности:

– по выражению (8.33) рассчитывают время осаждения пылевых частиц под действием силы тяжести с верхней и нижней его границы;

– по выражению (8.38) рассчитывают путь, пройденный пылевыми частицами с этих границ облака под действием ветра;

– по этим данным и известным расстоянием места взрыва до границ карьера устанавливают, какая часть монодисперсного облака выносится за пределы карьера;

– по известным геометрическим параметрам пылевого облака, которое выносится ветром за пределы карьера, устанавливают площадь основной зоны осаждения пыли;

– устанавливают зону расширения площади рассеивания пыли от турбулентных пульсаций в поперечном направлении к движению облака, которые составляют до 5% от скорости ветра.

По этим данным можно определить площадь рассеивания пылевого облака под действием ветра. Массу пыли, которая рассеялась на прилегающие территории, можно вычислить по установленному в работе [14] значению удельного выброса пыли при подрывании для разрушения горных пород “Украиниста-ПП-1”, которое колеблется в диапазоне 0,106-0,218 кг/кг ВВ. Кроме этого, необходимо рассчитать массу пыли, которая выносится ветром за пределы карьера. Частное от деления массы осевшей пыли на площадь рассеивания являются плотностью выбросов пыли в атмосферу при массовых взрывах (в т/км^2).

Произведём эти расчёты для массового взрыва мощностью 500 т в рудном карьере глубиной 300 м при скорости ветра 5 м/с. Причем примем наихудшие условия по загрязнению прилегающих территорий выбросами пылевого облака, которые соответствуют проведению взрывных работ в прямоточной части вет-

ровых потоков в карьере.

Процесс осаждения пылевых частиц в карьерном пространстве при естественном проветривании ветровыми потоками весьма сложен. Во-первых, под действием силы тяжести $F_m = mg$ и силы сопротивления движению $F_c = 3\pi\mu d_ч\vartheta$ частица оседает. Во-вторых, частица сносится в сторону наветренного борта карьера горизонтальной составляющей вектора скорости воздушного потока, направленного вдоль борта карьера, которая меняется с глубиной карьера. В-третьих, на частицу будет действовать сила лобового давления воздушного потока, которая пропорциональна квадрату вертикальной составляющей скорости воздушного потока на рассматриваемой глубине карьера и миделевому сечению пылевой частицы и равна $F_л = \dfrac{\rho_в U_{B\text{I}}^2}{2}\dfrac{\pi d^2}{4}$. Здесь вертикальная составляющая скорости воздушного потока по наветренному борту карьера равна произведению скорости ветра на поверхности и синуса угла наклона борта карьера.

Если суммарная сила тяжести и сопротивления движению больше силы лобового давления, то частица будет оседать. В противном случае частица всплывает и воздушным потоком будет уноситься за пределы карьера (рис. 8.13). Кроме этого, скорость воздушного потока по глубине карьера снижется и при оседании частиц на наветренный борт карьера высота оседания также снижается.

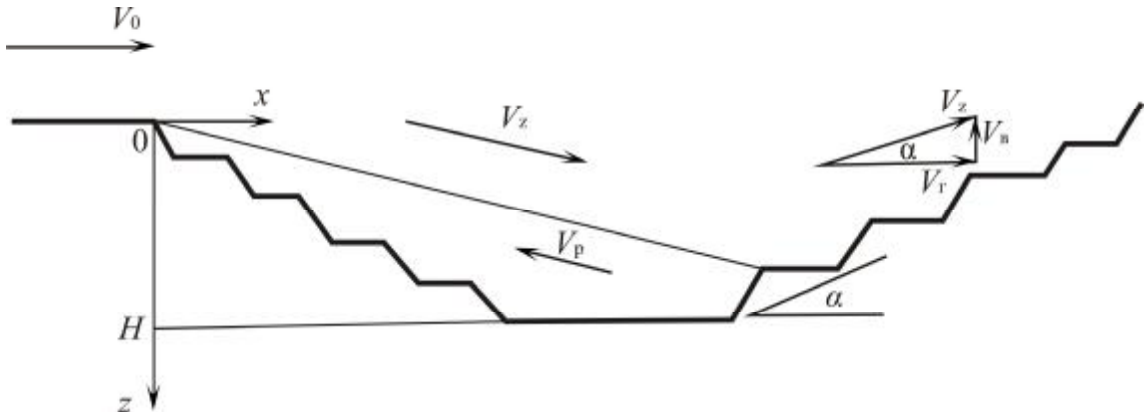


Рис. 8.13. Движение пылевой частицы вдоль наветренного борта карьера

Проведём оценку вероятности выноса пылевых частиц воздушным потоком за пределы карьера. Для этого рассчитаем по выражению (8.27) скорость воздушного потока на верхней и нижней границах монодисперсных пылевых облаков при средней скорости ветра, равной 5 м/с. Результаты расчётов сведены в табл. 8.9.

При равенстве сил, способствующих всплытию и осаждению, частица остановится в своём движении в вертикальной плоскости и под действием горизонтальной составляющей скорости воздушного потока будет снесена на наветренный борт карьера. Это произойдёт при следующем условии

$$F_T - F_c = F_л .$$

Таблица 8.9

Скорость воздушного потока на границах монодисперсных облаков

Диаметр пылевых частиц облака, мкм	Скорость на верхней границе, м/с	Скорость на нижней границе, м/с	Средняя скорость, м\с
1	3,10	2.80 (0,560 U_0)	2,95
3	2,90	2,56 (0,512 U_0)	2,73
7	2,56	1,53 (0,306 U_0)	2,05
13	2,49	1,31 (0,262 U_0)	1,90
23	2,46	0,73 (0,146 U)	1,60
38	2,43	0,28 (0,060U_0)	1,35
73	2,42	0,02 (0,004U_0)	1,22

Выразим значения сил через их параметры:

$$mg - 3\pi\mu d_ч U_0 Sin\alpha = \frac{\rho_в U_{BI}^2}{2}\frac{\pi \cdot \mathrm{d}_ч^2}{4} \quad \text{или} \quad \rho_ч \frac{\pi g \mathrm{d}_ч^3}{6} - 3\pi\mu \mathrm{d}_ч U_{BI}^2 = \frac{\rho_в \pi U_{BI}^2 \mathrm{d}_ч^2}{8}.$$

После сокращений и перегруппировки составляющих получим:

$$\frac{\rho_ч g d_ч^2}{6} - \frac{\rho_в U_{BI}^2 d_ч}{8} - 3\mu U_{BI}^2 = 0, \qquad (8.39)$$

где $d_ч$ – диаметр частицы, м; $\rho_ч$ – плотность пылевой частицы, кг/м^3; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па·с; $U_{Bi} = U_{Гi}\ Sin\alpha$ – вертикальная составляющая скорости воздушного потока на i-том уровне по глубине карьера, м/с; $U_{Гi}$ – горизонтальная составляющая воздушного потока на i-той глубине карьера, м; α – угол наклона наветренного борта карьера, град.

Из выражения (8.39) можно найти диаметр пылевых частиц, больше которого они оседают в карьере и на его поверхность не выносятся. Для этого решим это выражение относительно диаметра частицы:

$$d = \frac{3}{8}\frac{\rho_в}{\rho_ч}\frac{\mathrm{U}_{Гi}^2 Sin^2\alpha}{g} + \left[\left(\frac{3}{8}\frac{\rho_в}{\rho_ч}\frac{\mathrm{U}_{Гi}^2 Sin^2\alpha}{g}\right)^2 + \frac{18\mu \mathrm{U}_{Гi} Sin\alpha}{\rho_ч g}\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (8.40)$$

Можно сделать вывод о том, что диаметр частиц выносимой воздушным потоком пыли находится в прямой зависимости от скорости воздушного потока в карьере на уровне её нахождения по глубине и угла наклона наветренного борта карьера и в обратной зависимости от плотности пылевых частиц. С помощью полученной зависимости можно провести анализ по определению максимального диаметра пылевых частиц, которые при известной скорости ветра будут вынесены воздушным потоком за пределы карьерного пространства. Либо можно решать обратную задачу по определению скорости ветра, при которой конкретная пылевая частица будет вынесена за пределы карьера с известными его геометрическими параметрами.

Решим задачу по определению максимального размера пылевых частиц,

которые с каждого монодисперсного облака будут вынесены за пределы карьера под действием средней скорости воздушного потока по этому облаку. Будем решать эту задачу для железорудной пыли и пыли глины при углах наклона наветренного борта карьера 15°, 30° и 45°. Скорость ветра на поверхности карьера примем средней по бассейну и равной 5 м/с. По результатам расчётов можно будет сделать вывод, какая же пыль после массового взрыва будет вынесена из карьера воздушными потоками.

В графическом виде результаты расчётов представлены на рис. 8.14.

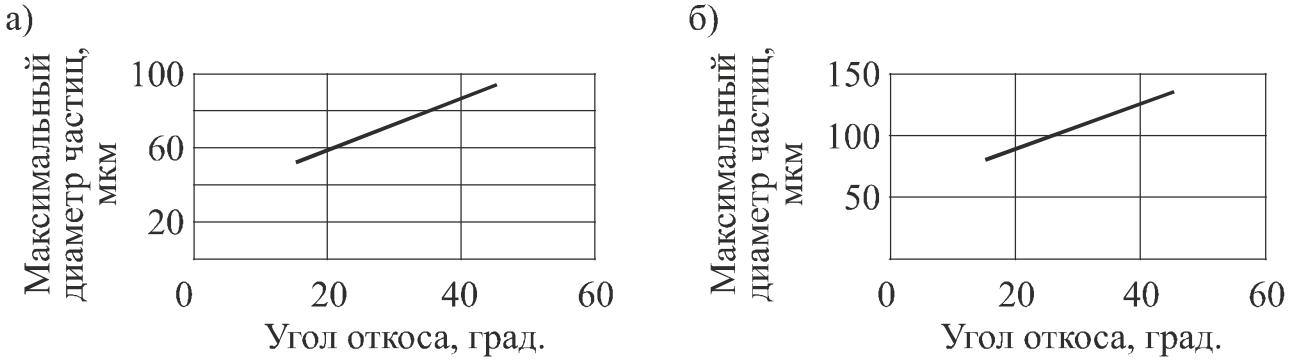


Рис. 8.14. Значения максимального диаметра пылевых частиц, которые могут быть вынесены за пределы карьера воздушными потоками с высоты центра монодисперсных облаков при различных углах наклона наветренного борта: а) железорудная пыль – $d_{\max} = 1{,}3767\alpha + 32{,}7; \mathrm{R}^2$; б) пыль глины – $d_{\max} = 1{,}8833\alpha + 50{,}8; \mathrm{R}^2$

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что железорудная пыль с диаметром частиц 100 мкм и более при скорости ветра 5 м/с из карьера воздушными потоками не выносится при любых углах наклона наветренного борта. Пыль глины с диаметром частиц 100 мкм при этих условиях не выносится из карьера только при угле наветренного борта 15° и менее.

Таким образом, в соответствии с проведенными расчётами можно сделать вывод о том, что при массовом взрыве в железорудном карьере при средней скорости ветра 5 м/с из карьера будет вынесена воздушными потоками железорудная пыль с максимальным диаметром частиц: 52,5 мкм при угле наклона наветренного борта 15°; соответственно – 75,7 мкм при угле наклона борта 30° и 93,8 мкм при угле наклона борта 45°.

Ветровой поток, достигая карьера в точке 0, начинает расширяться вглубь карьера, вследствие чего происходит его торможение и уменьшение скорости его движения. В результате над карьером образуется «шапка» из частично заторможенных слоёв воздуха. Ветровой поток на поверхности, движущийся со скоростью U_0, у верхней бровки подветренного борта карьера (точка 0) изменяет своё направление, начиная расширяться в сторону карьера и омывать подветренный борт. Встретив наветренный борт карьера, поток воздуха поворачивает вверх, двигаясь вдоль этого борта и сужаясь.

Первичное пылевое облако, которое образовалось в результате выброса

из скважин продуктов детонации ВВ и пыли, в дальнейшем при наличии ветра выносится ветровыми потоками из карьера.

Для решения задачи по определению параметров рассеивания пылевых выбросов при массовых взрывах на прилегающих территориях необходимо установить высоту ($h_з$) зоны смешивания воздушного потока, исходящего из карьера, с ветровым потоком (U_0), скорость исходящего потока (ϑ) и угол между векторами их скоростей (α) (рис. 8.11).

Как было показано ранее, скорость движения воздуха в карьере с увеличением глубины снижается. При приближении к наветренному борту турбулентные струи омывают его и здесь происходит их слияние. Скорость турбулентных струй с подъёмом вверх увеличивается, т.е. $\vartheta_1 < \vartheta_2 < \vartheta_3 < ... < \vartheta_n$.

Восходящие воздушные потоки вдоль наветренного борта карьера выносят пылевое облако из карьера. При этом вертикальная составляющая $\vartheta_B = \vartheta_i \cdot \cos(90 - \alpha)$ поднимает пылевое облако вверх, а горизонтальная $\vartheta_Г = \vartheta_i \cdot \cos\alpha$ – перемещает его в направлении ветра (рис. 8.15). Здесь ϑ_i – скорость воздушного потока на *i*-ой глубине карьера. В связи с тем, что ϑ_i с увеличением глубины снижается, верхние и нижние границы монодисперсных пылевых облаков поднимаются на разную высоту и переносятся в горизонтальном направлении на разные расстояния.

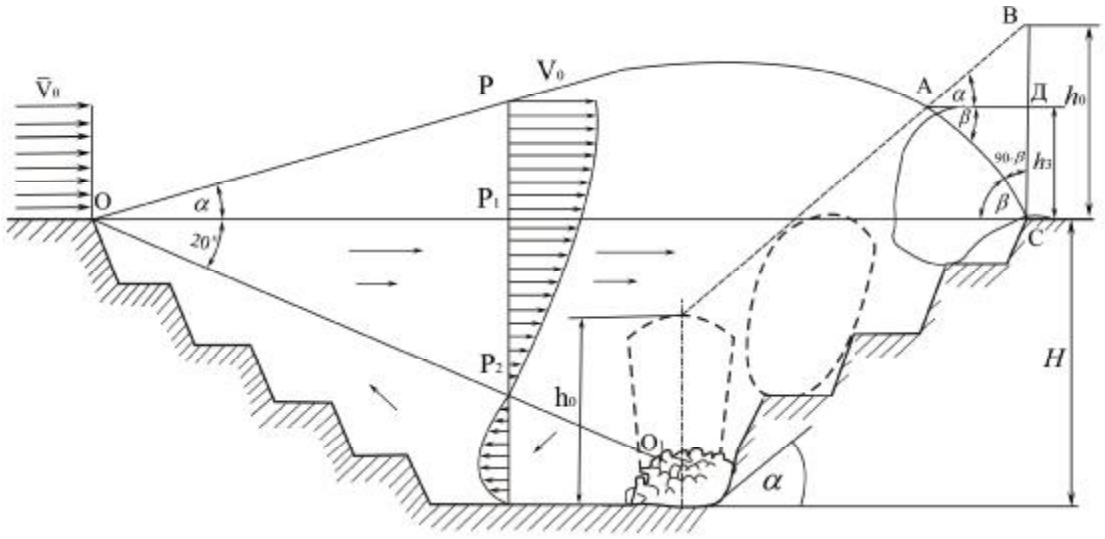


Рис. 8.15. Схема движения воздушного потока и пылевого облака в карьере

При рециркуляционной схеме проветривания, которая возникает при скорости ветра более 0,8-1 м/с и углах откоса подветренного борта $\alpha_1 > 15°$, вследствие резкого изменения направления твёрдой границы ветрового потока в точке 0 и значительных сил инерции последнего в этой точке происходит отрыв потока от твёрдой границы. В результате этого воздух в пространстве карьера движется в виде свободной струи с верхней и нижней границами. Выше верхней границы скорость воздуха равна скорости ветра на поверхности U_0. Сво-

бодная струя при достижении наветренного борта делится на две части. Первая часть, двигаясь вдоль уступов вверх, выходит на поверхность. Вторая – поворачивает вниз и, двигаясь в направлении, противоположном первоначальному, образует также свободную струю, называемой струей второго рода.

Следовательно, при рециркуляционной схеме проветривания в карьере имеются две зоны с различным характером движения воздуха в них:

1) *активная зона*, направление движения воздуха в которой совпадает с направлением ветра. Граница её проходит под углом $\alpha_2 \approx 15°$ (линия 00_1).
2) *вихревая зона* с противоположным направлением движения воздуха (между подветренным бортом и линией 00_1 – струя второго рода).

Поля скоростей в струе первого рода подобны на участке от 0 до сечения PP_2, а в струе второго рода – в пределах дна карьера.

Расчёт рассеивания пылевого облака производим в следующей последовательности.

Определяем высоту выброса пылегазового облака при выходе из карьера под действием ветровых потоков вдоль наветренного борта.

Поскольку первичное облако представляет собой смесь пылевых частиц всех фракций, то под действием скоростного напора, который снижается с увеличением глубины, оно с разной скоростью по высоте будет перемещаться вдоль борта карьера без сепарации частиц, так как скорость потока более 2-3 м/с. Верхняя граница первичного пылевого облака находится в зоне более высоких скоростей воздушного потока по сравнению с нижележащими слоями и перемещается параллельно наветренному борту карьера, и быстрее остальной части облака достигает границы свободной струи φ_1. На этой границе пылевые частицы попадают в зону ветрового потока на высоте $h_з$ от земной поверхности (рис. 8.15), который их сносит в горизонтальном направлении. Нижележащие слои полидисперсного пылевого облака также под действием восходящего потока воздуха перемещаются вдоль наветренного борта карьера. Причём, в соответствии с распределением скоростей воздушного потока в поперечном сечении свободной струи первого рода, более нижние слои пылевого облака движутся с меньшей скоростью. Поэтому эти слои достигнут верхней границы свободной струи на разной высоте $h_з$. Нижний слой облака достигнет этой границы в точке *C* на кромке борта карьера.

Таким образом, первичное пылевое облако, сохраняя полидисперсное состояние, под действием восходящих воздушных потоков вытягивается вдоль наветренного борта карьера и при достижении границы свободной струи φ_1 ветровым потоком выносится за пределы карьера. При этом верхняя граница пылевого облака поднимается над уровнем земной поверхности на высоту $h_з$. Долее частицы движутся по криволинейной траектории под действием двух сил: силы тяжести вниз и силы ветрового давления в горизонтальном направлении. Крупные пылевые частицы имеют большую скорость осаждения и быстро достигают земной поверхности.

Мелкодисперсные частицы из-за малых скоростей осаждения уносятся ветром на большие расстояния. Конечной целью исследований является опре-

деление границ рассеивания пылевого облака при массовом взрыве в карьере.

Для решения этой задачи необходимо определить высоту верхней границы пылевого облака относительно уровня земной поверхности $h_з$ при его выходе из карьера (рис. 8.15). Если на рисунке продлить направление движения верхней границы облака с точки *А* до точки *В*, то от резок *ВС* будет равен высоте первичного облака относительно дна карьера h_0. Из двух прямоугольных треугольников Δ*АДС* и Δ*АВД* находим высоту верхней границы облака при его выходе из карьера:

$$h_з = \frac{\mathrm{h}_0}{1 + tg\alpha \cdot tg(90 - \beta)}, \tag{8.41}$$

где α – угол откоса наветренного борта карьера, град.; β – угол между границей свободной струи и плоскостью земной поверхности, град.

После выноса пылевых частиц из карьера они из полидисперсного облака под действием силы тяжести оседают на земную поверхность. В общем случае концентрация тяжёлых примесей в атмосфере достаточно быстро изменяется в пространстве и во времени. Изучение этих изменений в приземном слое атмосферы на высоте до 100 м представляет собой трудную задачу, поскольку они обусловлены многими факторами (источниками поступления примесей в атмосферу, воздушными течениями, температурной стратификацией атмосферы, облачностью, состоянием погоды, свойствами дневной поверхности и др.).

Согласно результатам исследований прогноза загрязнения воздуха при нормальных (наиболее часто встречающихся) метеорологических условиях основными факторами рассеивания пыли являются:

– направление и скорость ветра,
– плотность и размеры пылевых частиц,
– состояние температурной устойчивости приземного слоя атмосферы.

В дальнейших расчётах для их упрощения примем условия безразличной (или равновесной) стратификации, когда вертикальный поток тепла равен нулю, а изменение температуры воздуха с высотой происходит по адиабатическому закону. Учитывая небольшую вертикальную протяжённость приземного слоя, можно говорить о равновесной стратификации и в тех случаях, когда температура мало меняется с высотой, в частности при изотермии.

С учётом этих допущений время осаждение частиц *i*-ой фракции с верхней границы определится как:

$$t_{oci} = \frac{h_з}{\vartheta_{oci}}, \tag{8.42}$$

где $t_{oc\,i}$ – время осаждения пылевой частицы *i*-ой фракции с верхней границы выходящего из карьера облака, с; ϑ_{oci} – скорость осаждения пылевой частицы *i*-ой фракции под действием силы тяжести, м/с.

Расстояние рассеивания пылевой частицы *i*-ой фракции под действием бокового ветра определится как:

$$L_i = \kappa U_0 t_{oci}, \tag{8.43}$$

где L_i – максимальное рассеивание пылевых частиц *i*-ой фракции под действием

ветра, м; U_0 – скорость ветра, м/с, $к$ = 0,25-0,5 – коэффициент неравномерности скорости ветрового потока в течение суток.

Для примера проведём расчёт рассеивания пылевых частиц при массовом взрыве железорудной залежи мощностью 500т. Расчёты проводим с использованием выражений (8.41), (8.42), (8.43), таблицы 8.9.

Исходные данные для расчёта:

- глубина карьера – 300 м;
- угол откоса наветренного борта – 30°;
- высота первичного пылевого облака относительно дна карьера – 120 м;
- скорость ветра – 5 м/с;
- коэффициент неравномерности скорости ветрового потока в течении суток – 0,25;
- угол границы φ_1 с плоскостью земной поверхности – 40°;
- плотность железорудной пыли – 4000 кг/м^3;
- максимальный диаметр частиц железорудной пыли, выносимой из карьера при этих условиях – 75,7 мкм;
- удельный расход ВВ – 0,811 кг/м^3;
- глубина взрываемых скважин – 18 м;
- ширина взрываемого блока – 18 м.

Из выражения (8.47) находим высоту пылевого облака относительно земной поверхности при выходе его из карьера:

$$h_з = \frac{120}{1 + \text{tg}30 \cdot \text{tg}(90 - 40)} = \frac{120}{1 + 0{,}577 \cdot 1{,}19} = 71м.$$

Результаты дальнейших расчётов сводим в табл. 8.10.

Таблица 8.10

Результаты расчётов рассеивания облака железорудной пыли после массового взрыва

Показатели	Диаметр пылевых частиц, мкм						
	1	3	7	13	23	38	73
ϑ_{oc}, м/с	$0.012 \cdot 10^{-2}$	$0{,}108 \cdot 10^{-2}$	$0{,}587 \cdot 10^{-2}$	$2{,}02 \cdot 10^{-2}$	$6{,}33 \cdot 10^{-2}$	$17{,}28 \cdot 10^{-2}$	$63{,}79 \cdot 10^{-2}$
t_{oc}, с	591666,7	65740,7	12095,4	3514.9	1121,6	410,9	111,3
L_p, км	739,6	82,5	15,1	4,4	1,4	0,5	0,14

Расчёты рассеивания частиц железорудной пыли показали, что тонкодисперсная фракция (до 10 мкм) практически рассеивается в атмосфере, так как уносится ветром на большие расстояния от нескольких десятков километров до нескольких сотен километров. Грубодисперсная фракция (от 10 до 100 мкм) рассеивается на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Таким образом, при исследуемом массовом взрыве на прилегающей к карьеру земной поверхности на удалении от 0 до 140 м осядут грубодисперсные и

тонкоодисперсные фракции пыли с малых высот облака. На границе этого факела осядет пыль с максимальным диаметром 73 мкм, которая витала на верхней границе облака. На удалении 1,4 км от карьера проходит граница зоны, где полностью со всего облака осядет пыль с диаметром частиц в 23 мкм. В этой же зоне осядет и пыль более мелких фракций с промежуточных высот пылевого облака. На расстоянии 4,4 км проходит граница осаждения фракции 13 мкм и так далее.

Для определения плотности выбросов железорудной пыли в т/км^2 необходимо определить площадь её рассеивания. Для этого необходимо установить ширину площади осаждения пыли при её рассеивании. Максимальная ширина этой площади наблюдается в том случае, когда направление ветра является фронтальным к взрываемому блоку. В этом случае ширина пылевого облака на выходе из карьера равна длине взрываемого блока.

Длина взрываемого блока может быть определена из выражения

$$B_0 = \frac{A}{qhb},$$

где B_0 – длина взрываемого блока, м; A – мощность массового взрыва, кг; q – удельный расход ВВ, кг/м^3; h – глубина взрываемых скважин, м; b – ширина взрываемого блока, м (в нашем примере длина взрываемого бока равна 1900 м).

При дальнейшем движении облако вследствие турбулентной диффузии расширяется в поперечном направлении ветра. Интенсивность пульсаций в подвижной атмосфере составляет 3-5%. Таким образом, расширение зоны осаждения пыли при её рассеивании составляет (0,03...0,05)·L в обе стороны, где L – расстояние до выхода облака из карьера, м. Не сложно рассчитать ширину и площадь зоны осаждения пыли B_P на границах полного осаждения фракций. Результаты расчётов сведены в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Результаты расчётов геометрических параметров зоны рассеивания пыли

Параметры	Диаметр пылевых частиц, мкм						
	1	3	7	13	23	38	73
L_p, км	739,6	82,2	15,1	4,4	1,4	0,5	0,14
B_p, км	75,90	10,10	3,40	2,30	2,04	1,95	1,91
S_p, км^2	28770,4	489,1	40,0	9,2	2,8	0,96	0,27

Таким образом, по этим данным можно рассчитать площадь рассеивания пылевого облака под действием бокового ветра:

$$S = \left(\frac{B_0 + B_p}{2} \right) L_P = \left(B_0 + 0{,}05 U_0 \frac{h_з}{\vartheta_{oc}} \right) k \frac{U_0 h_з}{\vartheta_{oc}}, \qquad (8.44)$$

где B_o – ширина пылевого облака при в момент его выноса из карьера, м, которая равна длине взрываемого блока при фронтальном направлении ветра; $h_З$ – высота пылевого облака относительно земной поверхности в момент его выноса из карьера, м; U_0 – скорость ветра, м/с; ϑ_{oc} – скорость осаждения пылевых

частиц, м/с; $B_p = B_0 + 2 \cdot 0{,}05\ к \cdot U_0 \cdot t$ – ширина площади рассеивания пылевого облака на расстоянии L_P от карьера, м; L_P – расстояние рассеивания пылевого облака, м, $к$ – коэффициент неравномерности скорости ветра в течение суток.

На рисунке 8.16 представлена схема рассеивания пылевого облака после массового взрыва в карьере, на которой указаны границы оседания грубодисперсной пыли:

L_1 – граница осаждения самой крупной фракции пыли с верхних слоёв облака. В этой области рассеивания оседают все остальные фракции пыли, но с более низких слоёв облака. В нашем примере – это граница осаждения частиц диаметром 73 мкм;

L_2 – граница осаждения более крупной фракции, принятой за базовую. В нашем примере – это частицы с диаметром 38 мкм. На участке области рассеивания от границы L_1 до L_2 оседают все фракции пыли, кроме частиц с диаметром 73 мкм, которые осаждены в первой области;

L_3 – граница осаждения фракции пыли с диаметром частиц 23 мкм (для нашего примера);

L_4 – граница осаждения пыли с диаметром частиц 13 мкм (для нашего примера).

Расчёты площади рассеивания пылевого облака после массового взрыва для условий нашего примера при неизменной скорости ветра показали, что все фракции пыли рассеиваются на площади 28770,4 км^2. Так как тонкодисперсная пыль по массовому содержанию составляет около 10% от общей массы пыли в облаке и рассеивается на значительных территориях и больших расстояниях от места проведения массового взрыва, предлагаем оценку валовых выбросов пыли оценивать дополнительно и только для грубодисперсной пыли с диаметром частиц более 13 мкм. В нашем примере площадь рассеивания грубодисперсной пыли составляет 9,2 км^2.

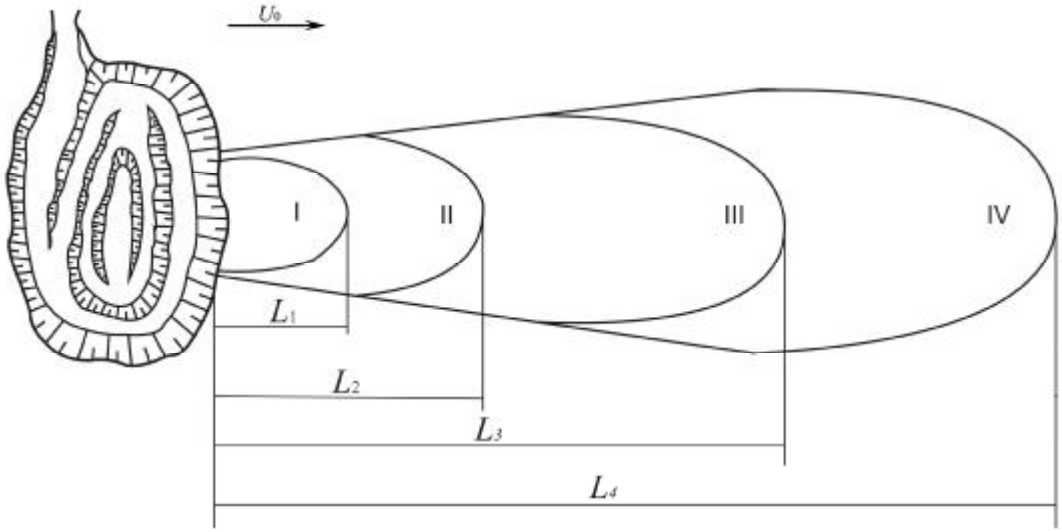


Рис. 8.16. Схема рассеивания пылевого облака после массового взрыва в карьере

Для количественной оценки валовых выбросов пыли на единицу площади рассеивания необходимо установить общую массу пыли в облаке при массовом

взрыве. Общая масса пыли может быть определена по установленному значению удельных выбросов пыли при применении украинита, максимальное значение которого равно 0,218 кг/кг ВВ. Для нашего примера

$$Q = A \cdot q_y = 500000 \cdot 0{,}218 = 109000 \text{ кг}.$$

По этим данным можно определить валовой выброс пыли на 1 км^2 для всех фракций путем деления общей массы пыли или отдельных её фракций на соответствующую площадь её рассеивания. При этом необходимо при расчётах учитывать полученное нами ранее количественное массовое соотношение частиц разных фракций в пылевом облаке (табл. 8.3).

Ранее установлено, что в облаке доля витающих частиц в диапазонах со средними диаметрами составляют: 1 мкм – 10,67%; 3 мкм – 11,24%; 7 мкм – 12,46%; 13 мкм – 14,15%; 23 мкм – 15,88%; 38 мкм – 17,37%; 73 мкм – 18,24%.

Таким образом, доля мелкодисперсной пыли в общем выбросе составляет около 34,37% (37463,3 кг), а доля грубодисперсной пыли – 65,63% (71536,7 кг).

Общий валовой выброс пыли при этом составляет:

$$q_{во} = \frac{Q}{S_p} = \frac{109000}{28770{,}4} = 3{,}789 \text{ кг/км}^2.$$

В том числе валовой выброс тонкодисперсной пыли составил:

$$q_{вт} = \frac{Q_т}{S_{рт}} = \frac{37463{,}3}{28770{,}4} = 1{,}302 \text{ кг/км}^2,$$

а валовой выброс грубодисперсной пыли составил:

$$q_{вг} = \frac{Q_г}{S_{рг}} = \frac{71536{,}7}{9{,}2} = 7775{,}7 \text{ кг/км}^2.$$

На территории Криворожского железорудного бассейна ежегодно производится около 225 массовых взрывов, которые разнесены во времени и ведутся при различной скорости и направления ветра. В этих условиях площадь, на которых осаждается пыль после массовых взрывов, её валовой выброс возрастает в сотни раз.

8.7. Запыленность атмосферы карьера в целом

Запыленность воздуха в карьере в целом (средняя или общая запыленность атмосферы карьера) характеризует возможность использования внутрикарьерного воздуха для оздоровления атмосферы отдельных его участков. Чем выше средняя запыленность воздуха в карьере, тем менее эффективным будет проветривание этим воздухом отдельных участков, и наоборот. Если средняя запыленность воздуха в карьере достигнет или превысит предельно допустимый уровень, проветривание участков карьера внутрикарьерным воздухом невозможно. В этом случае проветривание их может быть осуществлено лишь воздухом, подаваемым с поверхности (если запыленность последнего ниже предельно допустимого уровня).

Общая запыленность атмосферы карьера зависит от интенсивности пыле-

образования при производственных процессах и от скорости ветра в карьере.

При увеличении интенсивности пылеобразования при производственных процессах возрастает общая запыленность атмосферы карьера. Существенное значение при этом имеет скорость ветра, увеличение которой способствует более равномерному распространению пыли в атмосфере карьера. Наоборот, при штиле возможно образование высоких концентраций пыли у мест пылеобразования и сравнительно невысокая запыленность в остальной части карьера.

Вопросы для самоконтроля

1. Силы, формирующие движение воздуха в карьере.
2. Процессы переноса газов. Понятия, виды, определения.
3. Турбулентная диффузия. Расчет коэффициента турбулентной диффузии.
4. Распространение газа, выделяемого точечным источником.
5. Распространение газа, выделяемого линейным источником.
6. Угол раскрытия факела газа.
7. Определение концентрации газа в точке факела.
8. Распространение газов при взрывных работах.
9. Основные понятия и законы пылевой динамики карьеров.
10. Распределение пыли, выделяемой точечным и линейным источником.
11. Распределение пыли при взрывных работах.
12. Анализ физических процессов выброса пылегазового облака.
13. Метод расчёта высоты подъёма пылевого облака с учётом дисперсности частиц.
14. Расчёт скорости осаждения пылевых частиц из пылегазового облака.
15. Оценка параметров рассеивания пылевого облака при массовых взрывах в карьерах.
16. Запылённость атмосферы карьеров в целом.

РАЗДЕЛ 9. ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЯГА ВОЗДУХА В ШАХТАХ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в девятом разделе пособия:

– выявлять факторы, влияющие на возникновение естественной тяги в горных выработках шахты;

– охарактеризовать сезонные и суточные колебания величины естественной тяги в шахтах различной глубины;

– осуществлять измерение депрессии естественной тяги через перемычку;

– производить измерение величины естественной тяги через шибер в канале вентилятора;

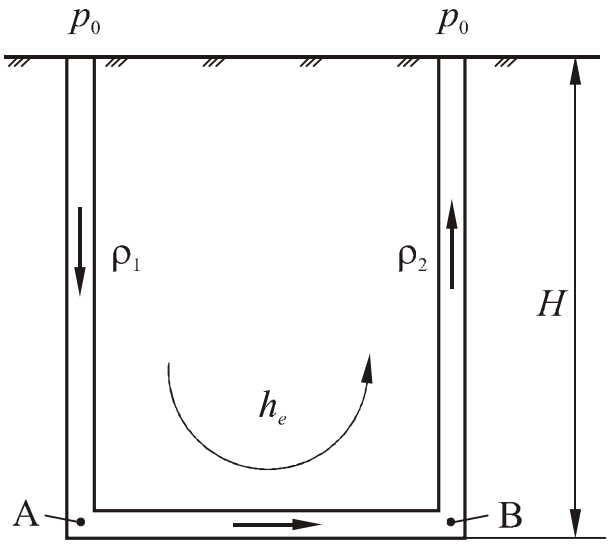
– выполнять измерение депрессии естественной тяги косвенным способом;

– производить расчет депрессии естественной тяги;

– осуществлять построение аэродинамической характеристики естественной тяги.

9.1. Общие сведения о естественной тяге

Естественной тягой называется движение воздуха под действием естественных факторов: разности удельных весов в двух сообщающихся вертикальных и наклонных выработках (рис. 9.1), скоростного давления ветра при вскрытии месторождений штольнями и капежа воды в стволах.



Разность удельных весов воздуха в двух стволах может быть обусловлена различием в температуре, влажности, давлении, химическом составе воздуха (например, при суфлярных выделениях и внезапных выбросах метана).

Основным фактором, влияющим на изменение плотности воздуха в шахтах, является температура. В воздуховыдающих стволах температура воздуха меняется мало.

Рис. 9.1. Схема к определению естественной тяги

В воздухоподающих стволах температура воздуха подвержена влиянию сезонных и даже суточных колебаний температуры наружного воздуха. Это обуславливает годовые колебания депрессии естественной тяги.

Разность удельных весов воздуха в воздухоподающем и воздуховыдаю-

щем стволах по определению является естественной тягой и может быть рассчитана из выражения:

$$h_e = \gamma_1 H - \gamma_2 H = (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot H ,$$

где h_e – естественная тяга, Па; γ_1, γ_2 – удельный вес воздуха в воздухоподающем и воздуховыдающем стволах соответственно, Н/м^3; H – глубина шахты, м.

Зимой γ_1 **f** γ_2, естественная тяга действует по направлено тяги, создаваемой вентилятором, и ее считают положительно (+h_e).

Летом γ_1 **p** γ_2, естественная тяга действует навстречу тяге, создаваемой вентилятором, и ее считают отрицательной (– h_e).

При $\gamma_1 = \gamma_2$ естественная тяга отсутствует (h_e=0).

Сезонные колебания величины естественной тяги представлены на рис. 9.2.

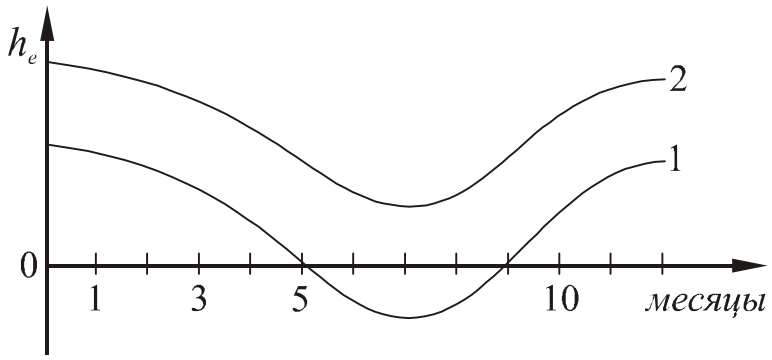


Рис. 9.2. Сезонное изменение депрессии естественной тяги в шахтах: 1 – небольшой глубины; 2 – глубоких шахтах

При подземных пожарах под действием тепловой депрессии, противонаправленной работе вентилятора, может значительно уменьшиться количество поступающего в шахту воздуха и даже произойти опрокидывание вентиляционной струи.

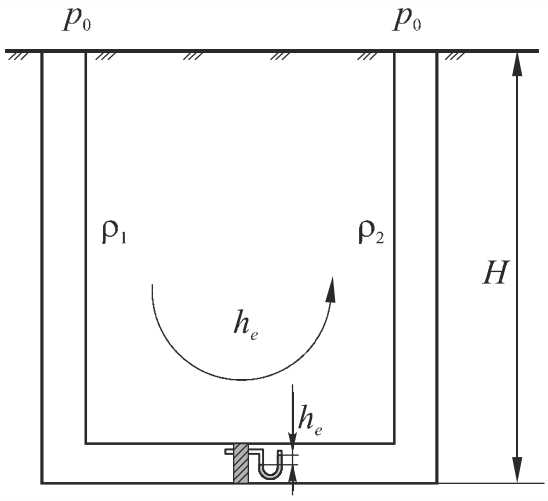
Капеж в воздухоподающем стволе способствует проветриванию шахты, а в воздуховыдающем – затрудняет проветривание и даже может приводить к кратковременному опрокидыванию вентиляционной струи.

В шахтах глубиной 400…500 м величина естественной тяги достигает 25...30 мм. вод. ст., а с глубиной 700…800 м – 50…60 мм. вод. ст. и выше.

9.2. Измерение депрессии естественной тяги

Естественная тяга передается потоку воздуха по всей его длине. Существует несколько способов замера депрессии естественной тяги:

1) с помощью микроманометра через перемычку;
2) через шибер в канале вентилятора;
3) косвенным способом.



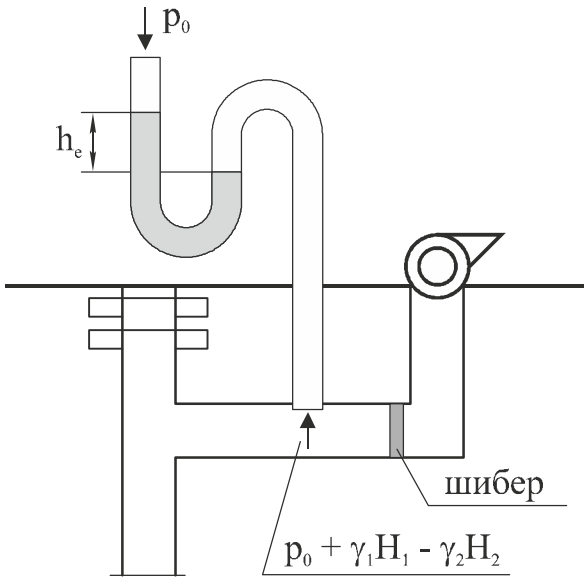
При использовании первого способа измерения в вентиляционной сети устанавливают перемычку и измеряют перепад давлений на ней при остановленном вентиляторе. Значение естественной тяги определится как:

$$h_e = (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot H$$

Положение перемычки в системе выработок не имеет значения (рис. 9.3). Замер должен производиться быстро, чтобы температура воздуха по обе стороны перемычки не изменилась.

Рис. 9.3. Схема установки перемычки для измерения естественной тяги

При измерении естественной тяги через шибер в канале вентилятора вентилятор останавливают, а канал перекрывают шибером. Затем штуцер микроманометра со знаком «–» соединяют резиновой трубкой с каналом за шибером, который воспринимает давление $p_0 + \gamma_1 H_1 - \gamma_2 H_2$. Штуцер со знаком «+» соединяют резиновой трубкой с поверхностью и он воспринимает давление p_0 (рис. 9.4).



Значение естественной тяги при равенстве $H = H_1 = H_2$ определится как:

$$h_e = (p_0 + \gamma_1 H - \gamma_2 H) - p_0 = (\gamma_1 - \gamma_2) H .$$

Рис. 9.4. Положение микроманометра при измерении депрессии естественной тяги через шибер

Для измерения депрессии естественной тяги косвенным способом при работающем вентиляторе измеряют количество воздуха Q_0 и депрессию вентилятора, а затем при остановленном вентиляторе определяют дебит естественной тяги Q_e. Величина h_e определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} h_в + h_e = RQ_0^2 \\ h_e = RQ_e^2 \end{cases};$$

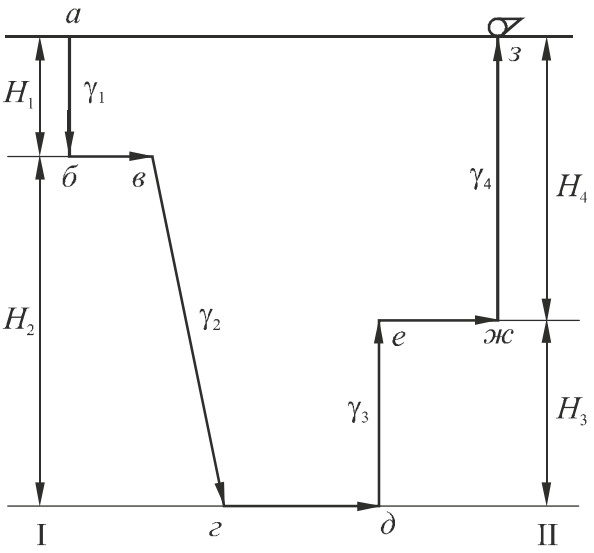
$$h_e = \frac{h_в}{\left(\frac{Q_0}{Q_e}\right)^2 - 1}.$$

9.3. Расчет депрессии естественной тяги

Наиболее распространенным является гидростатический метод, при котором определяется разность давлений воздуха в двух столбах разной высоты. При наличии нескольких вертикальных и наклонных выработок (рис. 9.5):

$$h_e = \left(\sum \gamma_i H_i\right)_I - \left(\sum \gamma_i H_i\right)_{II};$$

$$h_e = H\left(\gamma_{ср.I} - \gamma_{ср.II}\right).$$



Для получения значений γ производят замеры температуры и давления воздуха в характерных пунктах шахтной вентиляционной сети. Расчет γ ведут по известной формуле

$$\gamma = 0{,}455\frac{p}{T}.$$

Рис. 9.5. Схема соединения горных выработок для расчёта h_e

Для менее точных расчетов применяется формула

$$h_e = 0{,}47\frac{H}{100}\left(t_{ср}^{П} - t_{ср}^{В}\right), \text{ мм вод. ст.,}$$

где $t_{ср}^{П}$, $t_{ср}^{В}$ – средние температуры воздуха, поступающего в шахту и выходящего из нее, ^{0}С.

9.4. Аэродинамическая характеристика естественной тяги

Характеристика естественной тяги – это зависимость депрессии естественной тяги от количества подаваемого в шахту воздуха (рис. 9.6).

В холодный период года (зимой) с увеличением расхода воздуха Q его температура в стволе понижается, а γ в воздухоподающем стволе увеличивается, что приводит к повышению депрессии естественной тяги. В жаркое время года (летом) происходит обратное явление. Обычно при расчетах принимается, что депрессия естественной тяги h_e не зависит от расхода воздуха Q.

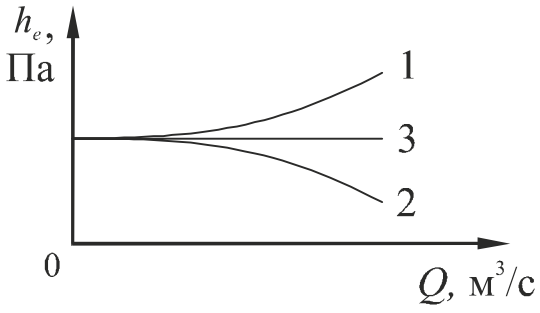


Рис. 9.6. Характеристика естественной тяги: 1 – зимой; 2 – летом; 3 – принимаемое значение

Вопросы для самоконтроля

1. Общие сведения о естественной тяге.
2. Сезонные и суточные колебания величины естественной тяги в шахтах различной глубины.
3. Измерение депрессии естественной тяги через перемычку.
4. Измерение величины естественной тяги через шибер в канале вентилятора.
5. Измерение депрессии естественной тяги косвенным способом.
6. Расчёт депрессии естественной тяги.
7. Аэродинамическая характеристика естественной тяги.

РАЗДЕЛ 10. РАБОТА ВЕНТИЛЯТОРОВ НА ШАХТНУЮ СЕТЬ

Перечень умений, которые специалист с высшим образованием должен приобрести в результате усвоения информации, изложенной в десятом разделе пособия:

- осуществлять выбор вентилятора для проветривания шахты;
- производить регулирование подачи вентилятора;
- описывать характеристику вентилятора математической зависимостью;
- определять фактический режим работы вентилятора на шахтную сеть.

10.1. Общие сведения о вентиляторах

Подача в шахту достаточного количества воздуха и устойчивость вентиляции достигается только посредством вентиляторов.

Вентилятор – это турбомашина, которая перемещает воздух со среды с низким давлением в среду с более высоким давлением.

По принципу действия шахтные вентиляторы делятся на центробежные и осевые.

Центробежные вентиляторы: ВЦ-25, ВЦ-31,5, ВЦД-47, ВРЦД-4,5.

Центробежный вентилятор (рис. 10.1) состоит из рабочего колеса 1, спирального кожуха 2, направляющего аппарата 3, входного патрубка 4, диффузора 5 с выходным коленом 6.

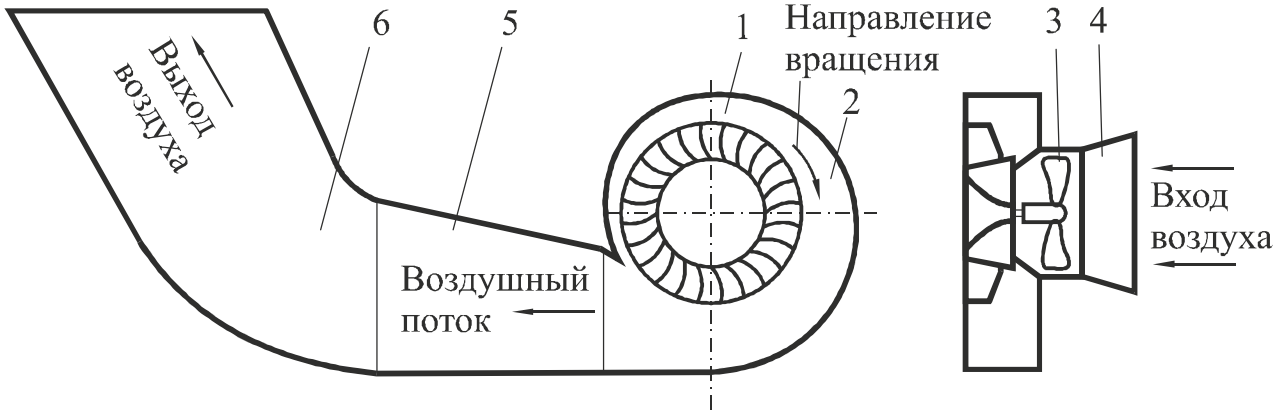


Рис. 10.1. Шахтный центробежный вентилятор

Воздушный поток поступает к рабочему колесу вентилятора через входной патрубок и направляющий аппарат. В колесе поток поворачивает на 90° из осевого в радиальное направление и под действием центробежной силы и динамического давления лопаток выбрасывается в спиральный кожух, откуда поступает в нагнетательный трубопровод или через диффузор и колено в атмосферу. Установленный перед рабочим колесом направляющий аппарат с поворотными лопатками служит для регулирования производительности.

Центробежные вентиляторы выполняются одностороннего или двусто-

роннего всасывания. Их рабочие колеса имеют от 6 до 64 лопаток, загнутых вперед, назад или радиальных. Кожухи вентиляторов спиральные, как правило, постоянной ширины, с радиальным диффузором или без него.

Осевой вентилятор (рис. 10.2) состоит из рабочего колеса 1 с профилированными лопатками 2, кожуха 3, коллектора 4, переднего обтекателя (кока) 5, спрямляющего аппарата 6, диффузора 7, вала и подшипников.

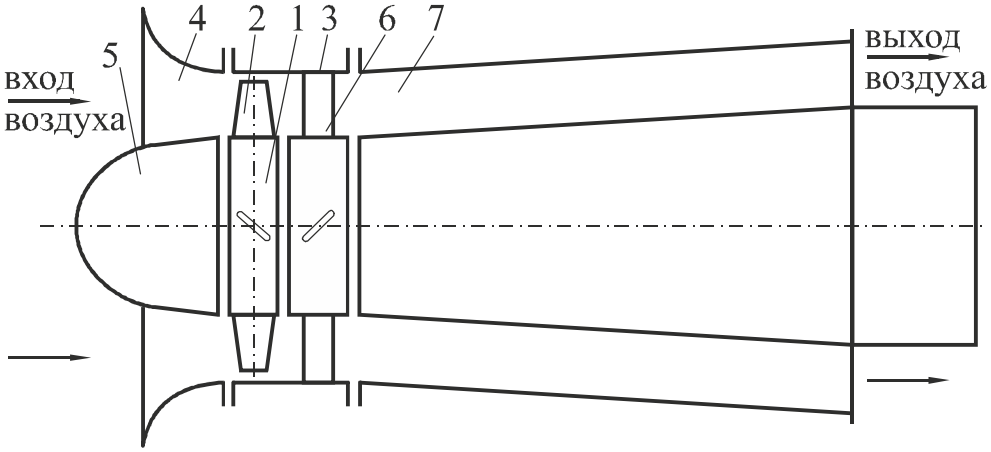


Рис. 10.2. Шахтный осевой вентилятор

Рабочим органом вентилятора служит ротор, приводимый во вращение электродвигателем и состоящий из колеса, вала и подшипников. При вращении ротора, в результате воздействия лопаток рабочего колеса на воздушный поток, перед колесом образуется разрежение, а за колесом – давление. В зону разрежения из канала поступает воздушный поток, который колесом перемещается вдоль оси вентилятора к диффузору или к нагнетательному трубопроводу.

Перед рабочим колесом установлен направляющий аппарат, предварительно подкручивающий воздушный поток, за рабочим колесом – спрямляющий аппарат, предназначенный для выпрямления воздушного потока. Направляющий и спрямляющий аппараты способствуют образованию устойчивого воздушного потока в вентиляторе и повышению давления.

Осевые вентиляторы низкого давления имеют одно рабочее колесо (одноступенчатые). Для повышения давления число рабочих колес увеличивается до двух и в редких случаях до трех и четырех (многоступенчатые вентиляторы).

Рабочие колеса шахтных осевых вентиляторов имеют число лопаток от 8 до 20. Относительные диаметры их втулок составляют 0,3-0,7 диаметра рабочего колеса. Зазоры между лопатками колес и кожухом не должны превышать 1,5% длины лопаток.

Регулирование производительности осевых вентиляторов производится изменением углов установки лопаток рабочих колес и углов установки закрылков лопаток направляющих аппаратов.

Достоинства осевых вентиляторов:

– малые размеры;

– большой диапазон регулирования;
– возможность применения быстроходных двигателей;
– реверсирование воздушной струи за счет реверсирования двигателя.

Осевые вентиляторы (ВОД-4,5) развивают напор до 300 мм. вод. ст. при дебите до 300 м^3/с, а центробежные, при том же дебите могут создавать напор до 800 мм вод. ст. (ВРЦД-4,5).

10.2. Аэродинамическая характеристика вентилятора

Для вентилятора, вращающегося с заданной скоростью, существует зависимость $h = f(Q)$ между депрессией вентилятора и его производительностью (рис. 10.3), которая называется *характеристикой вентилятора*. Вид и форма ее зависит от конструкции вентилятора, его размеров, скорости вращения.

Рабочая нисходящая часть характеристики большинства вентиляторов может быть довольно точно описана уравнением

$$h = a - bQ^2,$$

где a, b – коэффициенты, определяемые расчетным путем по графической характеристике.

10.3. Работа одиночного вентилятора на сеть

Шахтная сеть имеет в свою очередь характеристику вида $h = RQ^2$ (рис. 10.3). При работе вентилятора на сеть его Q и h должны удовлетворять как собственной характеристике вентилятора, так и характеристике сети, т. е. режим работы вентилятора определяется совместным решением уравнений характеристик вентилятора и сети, а при графическом решении – точкой пересечения аэродинамических характеристик вентилятора и шахтной сети (точка A).

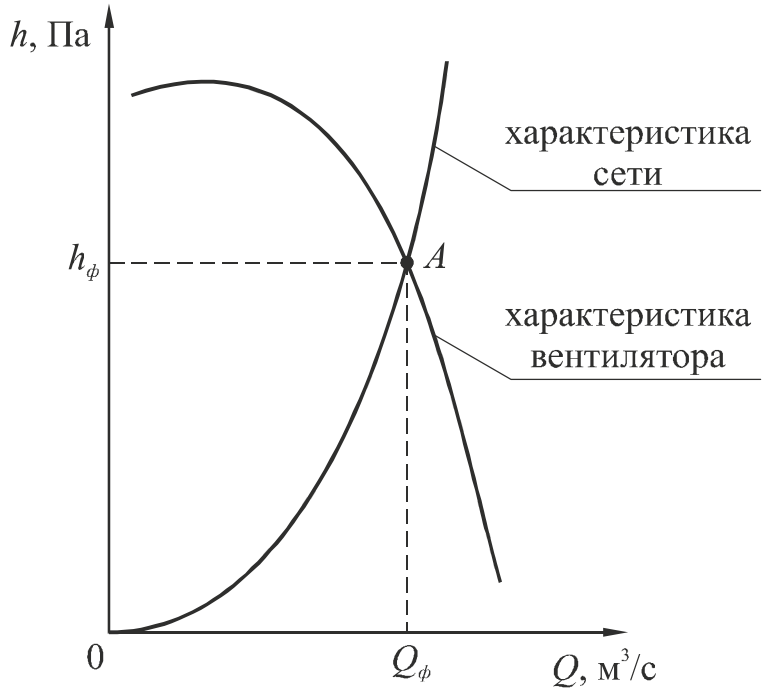


Рис. 10.3. Работа одиночного вентилятора на шахтную вентиляционную сеть

Вопросы для самоконтроля

1. Вентиляторы и их типы.
2. Конструкция и принцип работы центробежного вентилятора.
3. Конструкция и принцип работы осевого вентилятора.
4. Достоинства и недостатки осевых и центробежных вентиляторов.
5. Аэродинамическая характеристика вентилятора и способы ее представления.
6. Работа одиночного вентилятора на шахтную сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурін А.О., Бересневич П.В., Немченко А.А., Ошмянський І.Б. Аерологія гірничих підприємств. Підручник. – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. – 462 с.
2. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. – К.: Наукова думка, 1967. – 310 с.
3. Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И. Аэрология горных предприятий: Учебник для вузов. – 3-е изд. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
4. Рудничная вентиляция: Справочник / Под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1988. – 440 с.
5. Клебанов Ф.С. Воздух в шахте. – М.: 1995. – 575 с.
6. Правила безпеки у вугільних шахтах. НПАОП 10.0-1.01-10. – К.: Держнаглядохоронпраці України, 2010. – 432 с.
7. Збірник інструкцій до Правил безпеки у вугільних шахтах. Керівний нормативний документ: – Т. 1. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 480 с. (Укр. та рос. частини); – Т. 2. – К.: Мінпаливенерго, 2003. – 416 с.
8. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К.: Основа, 1994. – 311 с.
9. Схемы и способы управления газовыделением на выемочных участках угольных шахт. Государственный нормативный акт по охране труда. – К., 2006. – 78 с.
10. Дегазація вугільних шахт. Вимоги до способів та схеми дегазації. СОУ 10.1.00174088.001 – 2004. – К.: Минтопэнерго Украины, 2004. – 162 с. (укр. та рос. частини).
11. Руководство по дегазации угольных шахт. – М.: 1990. – 186 с.
12. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания: Справочник. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
13. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – М.: Недра, 1977.
14. Дриженко А.Ю. Открытая разработка железных руд Украины. Состояние и пути совершенствования / Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А. – Полтава: “Полтавский литератор”, 2009. – 451 с.
15. Тыщук В.Ю. Проблемы экологии при ведении открытых горных работ / В.Ю. Тыщук // Материалы научно-практической конференции “Проблемы экологии – 97’ (С.-Петербург, 12-14 ноября 1997 г.). – С.-Петербург: НИЦЭБ РАН, БГТУ, 1997. – С. 458.
16. Зберовский А.В. Охрана атмосферы в экосистеме «карьер – окружающая среда – человек» / Зберовский А.В. – Днепропетровск: РИО АП ДКТ, 1997. – 136 с.
17. Бересневич П.В. Аэрология карьеров. Справочник / Бересневич П.В., Михайлов В.А., Филатов С.С. – М.: Недра, 1990. – 280 с.
18. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Матвеев Л.Т. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 639 с.
19. Бересневич П.В. Исследование процессов развития и рассеивания

пылегазового облака при массовых взрывах в железорудных карьерах / Бересневич П.В., Фурса И.В. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – №5. – С. 58-62.
20. Ушаков К.З. Аэрология карьеров / Ушаков К.З., Михайлов В.А. – М.: Недра, 1985. – 272 с.
21. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 715 с.
22. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки / Белоусов В.В. − М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
23. Никитин В.С. Проветривание карьеров / Никитин В.С., Битколов Н.З. – М.: Недра, 1975. – 254 с.
24. Юрченко А.А. Физические процессы выброса пылегазовог облака при массовых взрывах в карьерах / Юрченко А.А. // Науковий вісник НГУ, № 2, 2010. – С. 85-88.
25. Юрченко А.А. Определение высоты подъема пылевого облака при массовом взрыве в карьере с учетом дисперсности частиц / Юрченко А.А., Колесник В.Е., Литвиненко А.А. // Матеріали міжнар. конф. «Форум гірників – 2010». – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2010. – С. 154-162.
26. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Медников Е.П. – М.: Наука, 1981. – 174 с.
27. Берлянд М.Е. Прогноз регулирование загрязнения атмосферы / Берлянд М.Е. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
28. Абрамов Ф.А., Шевелев Г.А. Свойства выбросоопасных песчаников как породы-коллектора. – Киев: Наукова думка, 1972. – 286 с.
29. Большинекий М.И. К вопросу о единстве природы выбросов угля, породы и газа в единых принципах борьбы с этими явлениями в подготовительных выработках. // Уголь, 1975. – № 11. – С. 10-14.
30. Большинекий М.И. Природа и механизм газодинамических явлений в угольных шахтах и принципы их предотвращения. // Уголь Украины, 1987. – № 9. – С. 24-28.
31. Забигайло В.Е., Лукинов В.В., Широков А.З. Выбросоопасность горных пород Донбасса. – Киев: Наукова думка, 1984. – 161 с.
32. Колесов О.А., Большинский М.И. Влияние технологии очистных работ на выбросоопасность пластов. // Уголь Украины. – 1988. – № 4. – С. 24-28.
33. Нановская С. Прогноз и средства борьбы с внезапными выбросами угля и газа. София. – 1986. Постоянная комиссия СЭВ по угольной промышленности.
34. Нановская С. Прогноз и средства борьбы с внезапными выбросами угля и газа. София. – 1986. Постоянная комиссия СЭВ по угольной промышленности.
35. Ольховиченко А.Е. Прогноз выбросоопасности угольных пластов. – М.: Недра, 1982. – 186 с.
36. Петросян А.Э., Иванов Б.М., Крупеня В.Г. Теория внезапных выбросов. – М.: Наука, 1983. – 210 с.

37. Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
38. Проскуряков Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках. – М.: Недра, 1980. – 263 с.
39. Фролов М.А., Бобров А.И. Суфлярные выделения метана в угольных шахтах. – М.: Недра, 1971. – 160 с.
40. Чернов О.И., Рязанцев Е.С. Предупреждение внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах. – М.: Недра, 1972. – 260 с.
41. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Наука, 1964. – 208 с.

Навчальне видання

Голінько Василь Іванович
Лебедєв Яків Якович
Литвиненко Анатолій Арсентійович
Муха Олег Анатолійович

АЕРОЛОГІЯ ГІРНИЧИХ ПІДПРИЄМСТВ

Навчальний посібник

(Російською мовою)

Видано в редакції авторів

Підписано до друку 16.05.2015. Формат 30х42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 11,4.
Обл.-вид. арк. 11,4. Тираж 50 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та надруковано
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.