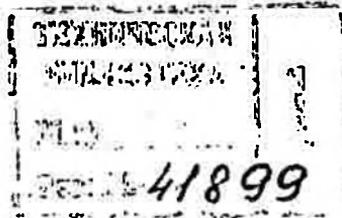


2005

622.41
D-93

В. В. ДЬЯКОВ,
В. И. КОВАЛЕВ

ПРОТИВОПЫЛЕВЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ НА РУДНИКАХ



МОСКВА «НЕДРА» 1984

Дьяков В. В., Ковалев В. И. Противопылевые вентиляционные режимы на рудниках. М., Недра, 1984, с. 200.

Дана характеристика источников выделения пыли в рудных шахтах. Проанализировано влияние динамических параметров вентиляционных потоков в горных выработках, влажности и температуры горных пород на интенсивность пылевыведения и запыленность рудничной атмосферы. Рассмотрены способы уменьшения интенсивности пылевыведения. Приведены результаты исследований сдвигания и осаждения пыли в горных выработках.

Для инженерно-технических работников предприятий, научно-исследовательских и проектных организаций горнодобывающих отраслей промышленности. Табл. 9, ил. 76, список лит. — 23 назв.

Рецензент — проф., д-р техн. наук Б. Ф. Кирик
Московский горный институт

ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ДЬЯКОВ
ВИТАЛИЙ ИВАНОВИЧ КОВАЛЕВ

ПРОТИВОПЫЛЕВЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ НА РУДНИКАХ

Редактор издательства В. Т. Вяновуров
Обложка художника Ю. Г. Асафова
Художественный редактор О. Н. Зайцева
Технический редактор О. Ю. Трепенюк
Корректор И. П. Розанова

ИБ № 4975

Сдано в набор 27.01.84. Подписано в печать 20.09.84. Т-17983.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная».
Печать высокая. Усл. печ. л. 12,5. Усл. кр.-отт. 12,88. Уч.-изд. л. 13,31.
Тираж 6240 экз. Заказ 1153/8985—10. Цена 75 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли,
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

Д 2501000000—497
043(01)—84 Сводн. пл. подписных изд., 1984 г.

© Издательство «Недра», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», принятыми XXVI съездом КПСС, предусматривается дальнейшее повышение производительности труда во всех отраслях народного хозяйства на основе технического перевооружения производства, широкого внедрения прогрессивной техники и технологии, обеспечивающих одновременно улучшение условий труда и охрану окружающей среды.

Техническое перевооружение горнорудной промышленности позволило существенно интенсифицировать производственные процессы, что, в свою очередь, привело к увеличению выделения вредных примесей в рудничную атмосферу.

Одной из основных вредных примесей, поступающих в воздух горных выработок рудных шахт, является пыль. Все производственные процессы, имеющие непосредственное отношение к добыче руды, связаны с образованием и выделением пыли в рудничную атмосферу. Пыль образуется при бурении и взрывании, при погрузке, транспортировке и разгрузке отбитой горной массы и в меньшей мере при креплении горных выработок.

Для снижения интенсивности ее выделения и поддержания запыленности в выработках на уровне допустимых концентраций применяется комплекс противопылевых мероприятий, включающий промывку водой шпуров и скважин при бурении, орошение горной массы при погрузочно-разгрузочных и скреперных работах, применение водяной забойки и водяных завес при взрывных работах, сухое пылеулавливание и другие средства пылеподавления.

Основным элементом комплекса противопылевых мероприятий является вентиляция. При любых средствах пылеподавления снизить запыленность рудничной атмосферы до уровня допустимых концентраций без правильно организованного проветривания выработок невозможно. Несмотря на это вопросы расчета и организации противопылевых вентиляционных режимов на рудниках до настоящего времени полностью еще не решены. Определение расхода воздуха, необходимого для проветривания выработок по пылевому фактору, в ряде случаев производят приближенным методом по «оптимальным» скоростям вентиляционной струи без учета фактической интенсивности пылевыделения [2, 3, 8, 9, 18]. Такой упрощенный подход к расчету обеспыливающего проветривания уже в стадии проектирования приводит к ощутимым ошибкам.

При существующих методах расчета количества воздуха, необходимого для проветривания, по интенсивности пылевыделения не учитывается влияние на ее величину скорости вентиляционной струи [4, 15, 17]. Между тем она существенно влияет на выделение пыли при бурении, погрузке, скреперной доставке руды и других производственных процессах. Чем выше скорость вентиляционной струи, тем больше пылевых частиц, при прочих равных условиях, переходит во взвешенное состояние. В связи с этим увеличение расходов воздуха на проветривание в некоторых случаях может привести не к снижению, а к увеличению

запыленности рудничной атмосферы, что необходимо учитывать при организации противопылевых вентиляционных режимов в горных выработках.

В последние годы на рудниках широко применяются электросварочные работы при ремонте вагонного и электровозного парка, при сварке воздуховодов и водопроводов, рельсовых путей и заземлений. Производство этих работ в горных выработках требует специальных мер против загрязнения рудничной атмосферы сварочным аэрозолем.

Исследованиями, проведенными на предприятиях судостроительной и машиностроительной промышленности [5, 20], установлено, что электросварочные работы являются весьма интенсивным источником образования аэрозоля. В состав покрытий электродов, применяемых в шахтах, входят титановый концентрат, марганцевая руда, ферромарганец, гематит, графит, рутил, плавиковый шпат, мел, жидкое стекло. В результате разложения покрытий образуется тонкодисперсный аэрозоль, содержащий токсичные соединения. На интенсивность образования пылевого аэрозоля при электросварочных работах основное влияние оказывают динамические параметры воздушных потоков в выработках.

На запыленность рудничной атмосферы существенное влияние оказывают процессы осаждения и сдувания пыли в выработках, интенсивность которых также зависит от аэродинамических параметров вентиляционных потоков.

Значительную трудность при организации последовательного проветривания забоев представляет стабилизация вредных примесей, в том числе и пыли, в исходящей из первого забоя струе при ведении в нем взрывных работ. Так, при производстве горных работ на двух горизонтах дробление негабаритных кусков руды в течение смены практически исключено из-за опасности загазирования вышележащих горизонтов. Поэтому эти работы приурочиваются к междусменным перерывам, что приводит к снижению производительности рабочих блоков. В то же время задача стабилизации концентрации вредных примесей в исходящих струях может быть решена за счет временного аккумуляирования и регулируемого выпуска их в исходящую струю.

Рассмотрению перечисленных выше вопросов, расчету и организации обеспыливающего проветривания горных выработок посвящена настоящая книга. Данные, использованные при ее написании, являются результатом выполненных под руководством и при непосредственном участии авторов научно-исследовательских работ, прошедших промышленную проверку и внедренных в производство.

В написании главы 6 принимал участие горный инженер В. Г. Глотов, главы 9 — горный инженер П. А. Коссов.

1. ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПО ВЫРАБОТКАМ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ

1.1. Общие сведения

При современной технологии добычи рудных полезных ископаемых удельный вес взрывных работ довольно большой. На рудных шахтах горно-капитальные, подготовительные и нарезные выработки проходятся с помощью буровзрывных работ, а наиболее производительные системы разработки базируются на использовании массовых взрывов. Массовая отбойка связана с большим выходом негабаритных кусков руды по сравнению со шпуровой отбойкой, а это в свою очередь увеличивает объем работ по вторичному дроблению негабаритов.

На выпуск и вторичное дробление руды на рудниках приходится 30—50 % общих затрат труда, потребного на очистную выемку, включая нарезные работы.

Вторичное дробление руды и ликвидация завесаний в большинстве случаев ведутся с применением наружных зарядов взрывчатых веществ (ВВ); причем на эти работы расходуется примерно столько же ВВ, сколько и на первичную отбойку.

При ведении взрывных работ пыль поступает в рудничную атмосферу. Запыление атмосферы выработок происходит не только за счет вновь образованной пыли, но и за счет срыва взрывной волной пыли, осевшей ранее на стенках. Дисперсность пыли, образующейся при взрыве, очень высокая.

На количество пыли, поступающей в горные выработки при взрывных работах, влияют: физико-механические свойства взрывааемых горных пород; свойства и величина заряда ВВ; способ и порядок взрывания; площадь поперечного сечения выработки, в которой производится взрывание; количество пыли, накопившейся на ее стенках; используемые средства пылеподавления и др. Кроме того, при ведении взрывных работ выделяется большое количество ядовитых газов. Для расчета проветривания выработок после взрывных работ необходимо знать количество выделившихся при взрыве вредных примесей, длину зоны отброса их в момент взрыва и характер распространения по выработке.

Рассмотрим выделение и распространение пыли при взрывании шпуровых зарядов ВВ в проходческих забоях и наружных зарядов ВВ на горизонтах скреперования.

1.2. Пылевыведение при взрывании шпуровых зарядов ВВ

Изучением интенсивности пылевыведения и длины зоны отброса продуктов взрыва при ведении взрывных работ шпуровым методом в проходческих забоях занимались В. Н. Воронин, Л. Д. Воронина, А. Д. Багриновский, А. И. Ксенофонтова, Г. А. Радченко, С. Ф. Шепелев, А. П. Янов, В. С. Ващенко и другие исследователи.

Для определения количества пыли N (г), поступающей в рудничную атмосферу выработки при взрывании шпурового заряда ВВ, рекомендована следующая формула [4]:

$$N = 1,5 \cdot 10^{-8} A^3 f \sqrt{S} / l_{\text{ш}}, \quad (1.1)$$

где A — количество взрываемого ВВ, кг; f — коэффициент крепости пород по шкале проф. М. М. Протождяконова; S — площадь поперечного сечения выработки, м²; $l_{\text{ш}}$ — средняя длина шпура, м.

Данная формула рекомендована авторами для использования при расчетах проветривания тупиковых выработок. Они считают, что в условиях, отличающихся от обычных (например, очень глубокие и большого диаметра шпуры или очень короткие и т. п.), зависимость (1.1) не будет соблюдаться в том виде, в каком она получена для обычных комплектов шпуров. Формула (1.1) учитывает как образование пыли в результате дробящего действия ВВ, так и ее поступление в рудничную атмосферу в результате срыва частиц пыли с поверхности боков, кровли и почвы выработок.

Авторы считают, что орошение поверхности выработки в призабойном пространстве снижает интенсивность пылевыведения на 20—30 %, поэтому в формулу следует вводить соответствующие поправки.

Для определения длины тупиковых выработок, загрязняемых продуктами взрыва, ими предложена следующая формула [4]:

$$l_{\text{з.о}} = 2 \cdot 10^4 A / (\gamma l_{\text{ш}} \sqrt{S}), \quad (1.2)$$

где $l_{\text{з.о}}$ — длина зоны отброса газа и пыли, м; γ — плотность отбиваемой руды или породы, кг/м³.

Для условий Криворожского бассейна А. П. Янов и В. С. Ващенко длину зоны отброса продуктов взрыва в горизонтальных горных выработках рекомендуют определять по следующим формулам [23]:

при огневом взрывании

$$l_{\text{з.о}} = m / l_{\text{ш}} + 0,3A; \quad (1.3)$$

при электрическом взрывании

$$l_{\text{з.о}} = 2i / l_{\text{ш}} + 0,3A, \quad (1.4)$$

где m — число шпуров в забое; i — число групп одновременно взрываемых шпуров.

Для определения начальной запыленности воздуха n_0 (мг/м³) в пределах зоны отброса продуктов взрыва ими предложена следующая формула [23]:

$$n_0 = K_{\pi} l_{\text{ш}} f K_c K_B, \quad (1.5)$$

где K_{π} — коэффициент пропорциональности ($K_{\pi} = 60$ для начальной максимальной запыленности и $K_{\pi} = 20$ — для средней запыленности); K_c — коэффициент, зависящий от способа взрывания (при электровзрывании $K_c = 0,5$, при огневом способе $K_c = 1,0$); K_B — коэффициент, зависящий от обводненности пород и выработки (для сухого забоя $K_B = 0,5$; для забоя с влажными породами или искусственным орошением $K_B = 1,0$; для забоя со слабым притоком и небольшим капежом $K_B = 2,0$; для обводненного забоя с обильным капежом или внутренней водяной забойкой $K_B = 3,0$).

При взрывании по слоистым и трещиноватым породам в формулу (1.5) вносится поправка 0,7—0,9. При взрывании в вертикальных стволах, наклонных выработках и в восстающих вносится соответствующая поправка, равная 0,1; 0,5 и 0,1.

1.3. Пылевыведение при взрывании наружных зарядов ВВ

При взрывании наружных зарядов ВВ так же, как и шпуровых, количество поступающей в воздух пыли зависит от массы заряда ВВ и коэффициента крепости взрывааемых пород. С увеличением этих показателей величина пылевыведения возрастает. Помимо величины заряда и крепости пород на интенсивность пылевыведения при взрывании наружных зарядов ВВ существенное влияние оказывают такие свойства ВВ, как работоспособность и бризантность.

На основании теоретических и экспериментальных исследований получено следующее выражение для определения величины пылеобразования N (г) при взрыве наружного заряда ВВ:

$$N = C \sqrt[3]{A^3 f}, \quad (1.6)$$

где C — коэффициент, учитывающий свойства ВВ, г^{1/3}.

С целью подтверждения справедливости уравнения (1.6) были выполнены исследования, сущность которых заключалась в следующем. В тупиковую выработку доставляли негабаритные куски руды, которые помещались у забоя. Дробление негабаритов осуществляли наружными зарядами ВВ величиной от 0,6 до 6 кг. Во избежание срыва пыли взрывной волной с боков, кровли и почвы выработки перед опытом их обильно поливали водой. Для получения сравнительных данных несколько взрывов было сделано без орошения.

В выработке на расстоянии, равном длине зоны отброса газа и пыли, устанавливали крепежную раму. Неплотности между стойками рамы и боками выработки тщательно заделывались. Перед началом опыта к верхняку рамы прибавляли брезентовую перемычку, свернутую в рулон. После взрывания, прежде чем газы

успевали распространиться до перемычки, ее опускали и плотно прижимали к раме, препятствуя распространению газа и пыли за нес. В заперемыченном пространстве определяли среднюю концентрацию пыли. Было проведено две серии опытов. Первая — с магнетитовыми рудами, коэффициент крепости которых $f=12$, вторая — с вкрапленными рудами с $f=18$.

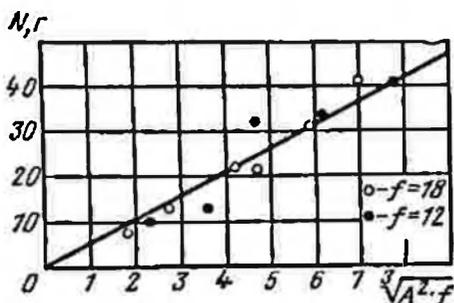


Рис. 1.1. График зависимости пылевыведения N от величины внешнего заряда ВВ A и коэффициента крепости взрывааемых пород f

Результаты экспериментов приведены на рис. 1.1. Экспериментальные точки образовали прямую, что подтверждает справедливость данной формулы. Значение коэффициента C для условий экспериментов получилось равным $5,45 \text{ г}^1/3$. Справедливость формулы (1.6) подтверждена также работами Г. А. Радченко [17]. Согласно его исследованиям значение C линейно зависит от работоспособности взрывчатых веществ G :

$G, \text{ см}^3$	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520
$C, \text{ г}^1/3$	12,4	12,6	11,9	11,3	10,8	9,8	9,2	8,6	7,8	6,8	6,3	5,3

1.4. Распространение газопылевого облака по выработкам при взрывании наружных зарядов ВВ

Для решения задач, связанных с проветриванием выработок после взрывных работ, большое значение имеет правильное определение объемов, загрязненных продуктами взрыва.

Наблюдения показывают, что процесс распространения образующегося при взрыве газопылевого облака можно разделить на два периода, которые характеризуются различными законами распространения вредностей: период ускоренного и период замедленного движения газа и пыли по выработке.

Первый период кратковременен и не превышает долей секунды. В момент взрыва газы и пыль отбрасываются на определенную длину, которая и является, собственно, зоной отброса.

Во втором периоде за зоной отброса газы и пыль распространяются по выработке с относительно небольшими скоростями, проходя за равные промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_n$ расстояния $\Delta l_1 > \Delta l_2 > \dots > \Delta l_n$ (рис. 1.2). Более нагретые по сравнению с окружающим воздухом газы распространяются поверху (у кровли выработки). У почвы выработки наблюдается движение воздуха в

противоположном направлении. На некотором расстоянии от места взрыва по мере охлаждения газов и выравнивания температур скорость их распространения по длине выработки становится незначительной и уже не может быть отмечена визуально. Газы заполняют все сечение выработки и их концентрация выравнивается. Основной причиной перемещения газов во втором периоде

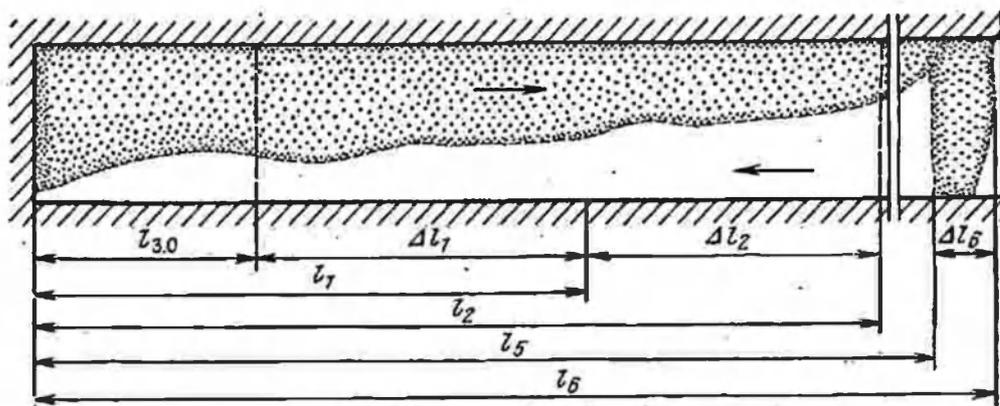


Рис. 1.2. Схема распространения газа и пыли после взрыва паружного заряда ВВ во втором периоде

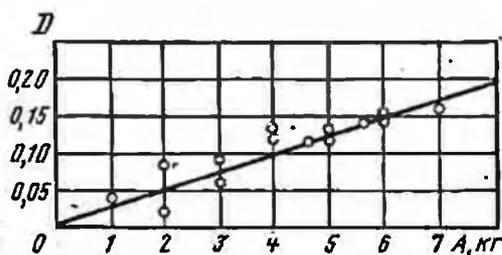


Рис. 1.3. График зависимости комплексного параметра D от величины заряда A

является тепловой напор, обусловленный разной плотностью нагретых взрывных газов и воздуха в выработке.

Исходя из того, что объем выработки, занимаемый продуктами взрыва в первый период, при прочих равных условиях прямо пропорционален массе заряда ВВ и обратно пропорционален аэродинамическому сопротивлению выработки, выведено следующее выражение для определения расстояния l' (м), на которое отбрасываются газы и пыль в момент взрыва наружного заряда ВВ:

$$l' = a \sqrt[4]{S^3} \alpha^{-0,5} A, \quad (1.7)$$

где a — экспериментальная постоянная; S — площадь поперечного сечения выработки, м^2 ; α — коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, $\text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$; A — величина заряда, кг.

На рис. 1.3 приведены обработанные в координатах $D = l' \alpha^{0,5} \times S^{-0,75}$ и A результаты производственных экспериментов по определению l' , выполненных в тупиковых выработках с площадью поперечного сечения 7,3 и 9,25 м^2 при взрывании зарядов ВВ массой от 1 до 7 кг. Экспериментальные точки удовлетворительно

расположились около прямой, построенной по уравнению (1.7), что подтверждает его справедливость. Эксперименты, выполненные в сквозных выработках, также подтвердили справедливость уравнения (1.7). Значение экспериментальной постоянной a , входящей в это уравнение, для тупиковых выработок равно $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-2} \cdot \text{х кг}^{-1}$, для сквозных — $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1,5}$.

Во втором периоде, как показали наблюдения, газопылевое облако распространяется с переменным отрицательным ускорением, абсолютная величина которого уменьшается во времени. Объясняется это тем, что со временем разность температур между газовым облаком и воздухом в выработке в результате теплообменных процессов уменьшается. Соответственно повышается плотность газового облака, уменьшаются скорость перемещения и сила сопротивления его движению.

Полагая, что величина ускорения за бесконечно малый промежуток времени изменяется пропорционально силе сопротивления, оказываемого стенками выработок движению газопылевого облака, можно получить следующее уравнение, описывающее изменение во времени длины газового облака во втором периоде:

$$l = l' + b \ln(1 + b_1 S^{-1} \alpha^{-1} t), \quad (1.8)$$

где b и b_1 — экспериментальные постоянные.

Уравнение (1.8) хорошо согласуется с опытными данными, полученными при измерении длины зоны распространения газопылевого облака при взрывании наружных зарядов ВВ различной величины в тупиковых сквозных выработках. Постоянная b равна 20,7 м; постоянная b_1 для тупиковых выработок равна 0,1, для сквозных — $0,15 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кг}^{0,25}$.

Экспериментальные взрывы в тупиковых и сквозных выработках показали, что через 20—30 с после взрыва вредные примеси заполняют все сечение выработки, концентрация их по сечению выравнивается, дальнейшее распространение по длине выработки газопылевого облака происходит с незначительной скоростью. Поэтому для практических расчетов при определении объемов выработок, загрязняемых продуктами взрыва наружных зарядов ВВ, можно ограничиться длиной зоны распространения газов и пыли за 25 с, которая может быть определена по формуле

$$l_{2,0} = KA + B, \quad (1.9)$$

где K — коэффициент, учитывающий отброс газов и пыли в момент взрыва заряда ВВ, м/кг; B — коэффициент, учитывающий распространение газа и пыли во втором периоде, м.

Для тупиковых выработок

$$K = 8,1 \cdot 10^{-2} S^{-1} \alpha^{-0,5}; \quad (1.10)$$

$$B = 20,7 \ln(1 + 2,5 S^{-1} \alpha^{-1} t). \quad (1.11)$$

Для сквозных выработок

$$K = 2,4 \cdot 10^{-1} S^{1/2} \alpha^{-0,5}, \quad (1.12)$$

$$B = 20,7 \ln(1 + 3,75 S^{-1/2} \alpha^{-1/2}). \quad (1.13)$$

Значения K и B , определенные по формулам (1.10) — (1.13), для выработок с различными площадями поперечного сечения и коэффициентами аэродинамического сопротивления приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Площадь поперечного сечения выработки, м ²	Коэффициент аэродинамического сопротивления $\alpha \cdot 10^3$, Н·с ² /м ⁴	Выработка			
		тупиковая		сквозная	
		K , м/ка	B , м	K , м/ка	B , м
3—4	9—12	2,0	31	5,9	38
	13—16	1,8	30	5,0	37
	17—20	1,6	29	4,4	36
	21—24	1,4	28	3,9	35
5—6	9—12	2,9	25	8,2	32
	13—16	2,5	24	7,0	31
	17—20	2,2	23	6,2	30
	21—24	1,9	22	5,5	29
7—8	9—12	3,6	22	10,3	28
	13—16	3,1	20	8,8	27
	17—20	2,7	19	7,8	26
	21—24	2,4	18	6,9	25
9—10	9—12	4,4	19	12,5	25
	13—16	3,8	18	10,6	24
	17—20	3,3	17	9,4	23
	21—24	3,0	16	8,4	22

2. ОБРАЗОВАНИЕ ШАХТНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ НЕПРЕРЫВНЫХ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЯХ

2.1. Образование пылевого аэрозоля в непроветриваемой выработке

При выполнении работ, связанных с выделением пыли в атмосферу непроветриваемых выработок, интенсивность образования аэрозолей зависит от характера производственного процесса, физико-механических свойств горных пород, применяемых средств пылеподавления и оборудования. Образовавшиеся при том или ином процессе частицы взаимодействуют с воздушной средой и переходят во взвешенное состояние.

Воздушная среда при любом процессе не остается абсолютно неподвижной из-за местных возмущений, обусловленных специфической процессом. При бурении подвижность воздуха обусловлена движением горнорабочих и выхлопом бурильных молотков; при погрузке — падающим материалом; при сварочных работах — тепловыми потоками, возникающими за счет высоких температур, и т. д. Под воздействием воздушных потоков происходят рассеивание частиц и усреднение их концентрации в объеме выработки в месте производства работ.

Одновременно с образованием аэрозолей под воздействием внешних сил и диффузионных процессов происходит осаждение частиц на почву, бока и кровлю выработки. Если учесть, что интенсивность осаждения прямо пропорциональна концентрации аэрозоля, процесс изменения концентрации пыли за бесконечно малое время dt при ведении работ в непроветриваемой выработке ограниченного объема, например в камере, может быть описан уравнением

$$dn/dt = \bar{F}_0/\bar{V} - n(v_n S_n + v_c S_c)/V, \quad (2.1)$$

где F_0 — интенсивность поступления пыли, мг/с; n — средняя концентрация пыли в выработке в любой момент времени t , мг/м³; v_n — скорость осаждения частиц аэрозоля на почву выработки под действием сил тяжести, м/с; v_c — скорость осаждения частиц на поверхность боков и кровли выработки за счет диффузионных процессов, м/с; S_n — площадь почвы, м²; S_c — суммарная площадь боков и кровли, м²; V — объем камеры, м³.

Проинтегрировав уравнение (2.1), получим

$$\frac{1}{v_n S_n + v_c S_c} \ln \left(n - \frac{F_0}{v_n S_n + v_c S_c} \right) + C = -\frac{t}{V}. \quad (2.2)$$

Значение постоянной интегрирования C определим из начальных и граничных условий. Очевидно, до начала работ, т. е. при $t=0$, запыленность $n=n_n$ (n_n — начальная концентрация пыли в камере). Подставив в (2.2) вместо n начальную концентрацию n_n и приняв $t=0$, найдем

$$C = \frac{1}{v_n S_n + v_c S_c} \ln \left(n_n - \frac{F_0}{v_n S_n + v_c S_c} \right). \quad (2.3)$$

Подставив в уравнение (2.2) значение C и решив его относительно n , получим

$$n = \frac{F_0}{v_n S_n + v_c S_c} + \left(n_n - \frac{F_0}{v_n S_n + v_c S_c} \right) \exp \left(-\frac{v_n S_n + v_c S_c}{V} t \right). \quad (2.4)$$

При установившемся процессе проветривания, когда время t достаточно велико, второй член правой части уравнения (2.4) стремится к нулю и им можно пренебречь.

В этом случае

$$n = F_0/(v_n S_n + v_c S_c). \quad (2.5)$$

Из уравнения (2.5) следует, что в непроветриваемой выработке ограниченного объема при наличии непрерывного источника пылевыделения запыленность воздуха не возрастает до бесконечности, а стремится к постоянной величине, выражаемой этим уравнением.

Уравнение (2.4) может быть представлено в виде

$$n = \frac{F_0}{a_c v_n S_n} + \left(n_n - \frac{F_0}{a_c v_n S_n} \right) \exp \left(- \frac{a_c v_n S_n}{V} t \right), \quad (2.6)$$

где a_c — коэффициент, учитывающий осаждение частиц на бока и кровлю выработки.

$$a_c = 1 + v_c S_c / (v_n S_n). \quad (2.7)$$

Поскольку для одного и того же источника выделения пыли при постоянных геометрических размерах выработки отношение $v_c S_c / v_n S_n = \text{const}$, уравнение (2.6) может быть использовано для экспериментального определения F_0 при выполнении различных производственных процессов. Каждый источник пылевыделения образует однотипные аэрозоли. Поэтому для одной и той же выработки значения a_c и v_n можно считать постоянными.

Введем обозначение

$$a_c v_n = \omega, \quad (2.8)$$

где ω — суммарная скорость осаждения пылевых частиц, м/с.

Решив уравнение (2.6) с учетом принятого обозначения (2.8) относительно F_0 , получим

$$F_0 = [n - n_n \exp(-\omega S_n t / V)] \omega S_n / [1 - \exp(-\omega S_n t / V)]. \quad (2.9)$$

Учитывая, что величина n_n обычно на 2—3 порядка меньше n , а $n_n \exp(-\omega S_n t / V)$ имеет еще меньшее значение, уравнение (2.9) можно привести к виду

$$F_0 = [n \omega S_n / [1 - \exp(-\omega S_n t / V)]]. \quad (2.10)$$

Для определения F_0 достаточно опытным путем определить n , S_n , t и ω . Тогда, подставив их значения в уравнение (2.10), можно рассчитать F_0 . Значения n , S_n и t определяются путем измерения этих величин в процессе наблюдения за изменением концентрации пыли в выработке при действующем источнике пылевыделения. Для определения ω необходимо проведение специальных экспериментов.

Значение ω может быть определено из следующих соображений. При недействующем источнике пылевыделения процесс осаждения твердой фазы аэрозолей описывается уравнением

$$dn/dt = -\omega n S_n / V. \quad (2.11)$$

Проинтегрировав уравнение (2.11), получим

$$\ln n + C = -\omega S_n t / V, \quad (2.12)$$

где t — время после окончания действия источника пылевыведения, с; n — концентрация пыли в выработке в момент времени t , мг/м³.

Значение постоянной интегрирования C определяется из начальных и граничных условий. Очевидно, сразу же после окончания действия источника пылевыведения $t=0$, а концентрация пыли в выработке будет n_0 . Приняв $t=0$, $n=n_0$, найдем

$$C = -\ln n_0. \quad (2.13)$$

Подставляя значение C в уравнение (2.12), найдем, что

$$\ln(n/n_0) = -\omega S_{\Pi} t / V, \quad (2.14)$$

где n_0 — концентрация пыли после окончания действия источника пылевыведения, мг/м³.

Измерив n_0 , n , t , S_{Π} и V , можно рассчитать значение ω по формуле

$$\omega = [V / (S_{\Pi} t)] \ln(n_0/n). \quad (2.15)$$

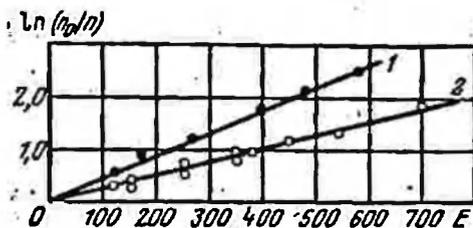


Рис. 2.1. График зависимости $\ln(n_0/n)$ в непроветриваемой камере от комплексного параметра E :

1 и 2 — соответственно после окончания бурения шпуров и электросварочных работ

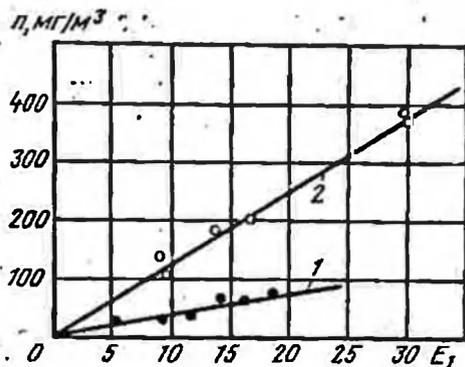


Рис. 2.2. График зависимости запыленности воздуха n в непроветриваемой камере от комплексного параметра E_1 :

1 и 2 — соответственно при бурении шпуров и при электросварочных работах

На рис. 2.1 представлены результаты наблюдений в координатах $\ln(n_0/n)$ и $E = S_{\Pi} t / V$ для буровых и электросварочных работ. Экспериментальные точки образовали прямую. Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс численно равен суммарной скорости

На рис. 2.2 показаны типичные графики изменения запыленности n в зависимости от комплексного параметра $E_1 = \omega S_{\Pi} t / V$.

Как видно из графиков (см. рис. 2.1 и 2.2), все точки удовлетворительно расположились около прямых, описываемых уравнениями (2.15) и (2.10), что подтверждает их справедливость. Тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс на рис. 2.2 соответствует значениям F_0 .

Полученные при проведении экспериментов значения ω и F_0 для буровых и электросварочных работ в непроветриваемой выработке приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Источник пылевидения	ω , м/с	F_0 , мг/с	Расход воды, л/мин
Бурение горизонтальных шпуров бурильным молотком ПР-30 с промывкой	0,0034	1,6	3,5
То же, двумя молотками ПР-30	0,0034	2,6	3,5
Бурение вертикальных шпуров с промывкой бурильным молотком ТП-45	0,0040	3,6	6
Электросварочные работы электродами:			
ОММ-5	0,0024	12,6	—
ОЗС-4	0,0025	7,2	—
МР-3	0,0019	7,1	—
меловыми	0,0025	6,2	—

2.2. Влияние скорости воздушного потока на интенсивность пылевидения

В проветриваемой выработке на процесс образования аэрозоля при непрерывном выделении пыли существенное влияние должны оказывать динамические параметры потока. Для того чтобы получить представление о характере этого влияния, рассмотрим механизм образования аэрозолей при основных производственных процессах.

При погрузке горной массы со скреперного полка и люковой погрузке запыление атмосферы выработок происходит в основном за счет мелких фракций руды, образованных во время ее отбойки.

При падении горной массы происходит как бы расслаивание частиц по крупности. Крупные частицы, падающие с большим ускорением, обгоняют мелкие, скорость падения которых определяется действием закона Стокса. При этом происходит взаимодействие частиц друг с другом и с крупными кусками. При движении крупных частиц и кусков руды впереди мелких па последние действуют вихри, образующиеся за крупными частицами и кусками. В результате некоторого разрежения, возникающего за крупными частицами, мелкие частички увлекаются турбулентными вихрями и движутся вслед за крупными примерно с такой же скоростью. Поля скоростей увлекаемого падающими кусками воздуха могут накладываться друг на друга и оказывать влияние на скорость падения и пространственное положение мелких частичек. При определенных условиях мелкая частичка может выйти из-под влияния крупных кусков и перейти во взвешенное состояние. Однако во взвешенное состояние переходят не все частицы мелких фракций, а только их часть. Это обусловлено наличием гидравлического и механического взаимодействия их, в результате которого происхо-

дит не только увлечение мелких частиц крупными кусками, но и коагуляция и осаждение их на крупных кусках.

Количество пыли, переходящей во взвешенное состояние, зависит как от свойств отбитой руды (измельченности, влажности и т. д.), так и от влияния внешней среды. Чем больше динамический напор воздушного потока, тем больше пылевых частиц переходит во взвешенное состояние. При определенных условиях интенсивность выноса мелких частиц может быть настолько значительной, что увеличение расхода воздуха приведет не к снижению, а возрастанию концентрации пыли в выработке.

При буровых работах в атмосферу выработок поступает только часть пылевых частиц, находящихся в общей массе буровой мелочи. Количество их зависит от способа бурения, применяемого инструмента, типа буровых коронок. В некоторых случаях, даже при бурении одними и теми же инструментами в одинаковых породах и при одинаковых режимах промывки, наблюдается различная интенсивность пылевыделения. Такое явление можно объяснить влиянием внешней среды. При возрастании скорости воздушного потока усиливается влияние аэродинамических сил воздушного потока на вылетающие из шпура частицы и мелкие капли воды, смочившие эти частицы. Чем больше скорость вентиляционной струи, тем больше крупных частиц и капелек могут перейти во взвешенное состояние. С течением времени капельки воды могут испариться. Частицы в этом случае остаются во взвешенном состоянии.

Из вышесказанного следует, что при бурении, скреперовании, погрузке руды и других производственных процессах, относящихся к источникам непрерывного выделения пыли, интенсивность пылевыделения в проветриваемой выработке всегда больше, чем в непроветриваемой. Обозначим отношение интенсивности пылевыделения в проветриваемой выработке F к интенсивности пылевыделения при отсутствии проветривания F_0 через K , тогда

$$F = F_0 K. \quad (2.16)$$

С другой стороны взаимосвязь между F и F_0 можно выразить в виде уравнения

$$F = F_0 + \Delta F, \quad (2.17)$$

где ΔF — приращение интенсивности пылевыделения за счет динамического воздействия вентиляционной струи.

Предположим, что приращение интенсивности пылевыделения прямо пропорционально динамическому напору воздушного потока. В этом случае должно быть справедливо соотношение

$$\Delta F / \Delta F_1 = h / h_1, \quad (2.18)$$

где ΔF — приращение интенсивности пылевыделения, соответствующее динамическому напору h ; ΔF_1 — приращение интенсивности пылевыделения, соответствующее динамическому напору h_1 .

Учитывая, что

$$h = v^2 \rho / 2, \quad h_1 = v_1^2 \rho / 2, \quad (2.19)$$

где v и v_1 — скорости воздушного потока, соответствующие динамическому напору h и h_1 , ρ — плотность воздуха в выработке, выражение (2.18) можно представить в виде

$$\Delta F / \Delta F_1 = v^2 / v_1^2, \quad (2.20)$$

откуда

$$\Delta F = (\Delta F_1 / v_1^2) v^2. \quad (2.21)$$

Из соотношения (2.20) следует, что

$$\Delta F_1 / v_1^2 = \text{const}. \quad (2.22)$$

Обозначим $\Delta F_1 / v_1^2 = \beta$, тогда

$$\Delta F = \beta v^2. \quad (2.23)$$

Подставляя значение ΔF из (2.23) в (2.17), получим

$$F = F_0 + \beta v^2. \quad (2.24)$$

Приравняв правые части уравнений (2.16) и (2.24) и произведя некоторые преобразования, найдем, что

$$K = 1 + (\beta / F_0) v^2. \quad (2.25)$$

Поскольку для каждого производственного процесса в конкретных горнотехнических условиях F_0 не меняет своего значения и практически остается постоянной величиной, то с учетом (2.22) получим

$$\beta / F_0 = \varphi = \text{const}. \quad (2.26)$$

Подставив в (2.25) значение β / F_0 из (2.26), получим

$$K = 1 + \varphi v^2, \quad (2.27)$$

где φ — опытный коэффициент, зависящий от вида производственного процесса, применяемых оборудования и средств пылеподавления, физико-механических свойств горных пород, $\text{с}^2/\text{м}^2$.

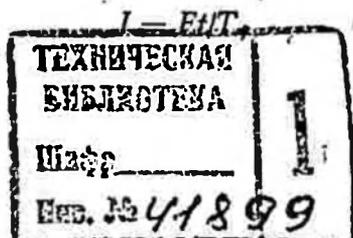
Для каждого производственного процесса и принятого оборудования значение φ должно определяться экспериментальным путем.

Заменяя в уравнении (2.16) K его значением из (2.27), получим

$$F = F_0 (1 + \varphi v^2). \quad (2.28)$$

Из уравнения (2.28) видно, что интенсивность непрерывных источников пылевыделения возрастает с увеличением скорости воздушного потока. Удельное пылевыделение I и интенсивность пылевыделения F связаны между собой зависимостью

$$I = F / v, \quad (2.29)$$



где t — чистое время бурения, погрузки, скреперования и т. п., с;
 T — объем выполненной работы, м или т.

Из уравнений (2.28) и (2.29) следует, что между удельным пылевыведением и скоростью вентиляционной струи существует зависимость

$$J = J_0(1 + \varphi v^2), \quad (2.30)$$

где J_0 — удельное пылевыведение в непроветриваемой выработке, мг/м или мг/т.

Для проверки справедливости уравнений (2.28) и (2.30), а также для определения значения F_0 , J_0 и φ были выполнены специальные исследования. Сущность исследований заключалась в определении интенсивности пылевыведения и удельного пылевыведения во время действия одного и того же источника образования пыли при разных значениях скорости вентиляционной струи. Для этого при каждом режиме проветривания производилось измерение средней запыленности воздуха перед источником пылевыведения и после него, по ходу вентиляционной струи. Отбор пылевых проб после источника пылевыведения производился только во время его действия. Одновременно с отбором пылевых проб измерялись скорость движения и расход воздуха в выработке, фиксировались время чистой работы механизма и объем выполненной работы.

Интенсивность пылевыведения при каждом режиме проветривания рассчитывалась по формуле

$$F = Q(n_2 - n_1), \quad (2.31)$$

где Q — подача воздуха, проходящего по выработке, м³/с; n_2 — запыленность воздуха после источника пылевыведения, мг/м³; n_1 — запыленность воздуха перед источником пылевыведения, мг/м³.

Удельное пылевыведение рассчитывалось с учетом зависимости (2.29). Результаты экспериментов по определению интенсивности пылевыведения и удельного пылевыведения при бурении горизонтальных шпуров и скреперной доставке руды представлены на рис. 2.3 и 2.4. Экспериментальные точки в обоих случаях образуют прямые, подтверждающие справедливость уравнений (2.28) и (2.30). Тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс численно равен коэффициенту β . Ордината точки пересечения прямой с осью ординат на рис. 2.3 соответствует F_0 , на рис. 2.4 — J_0 . При известных β и F_0 значение φ рассчитывается по формуле (2.26).

Исследования, выполненные при различных горно-геологических условиях, показали, что изменение интенсивности пылевыведения и удельного пылевыведения почти при всех производственных процессах в шахтах в диапазоне скоростей, регламентируемых Правилами безопасности, подчиняются закономерностям, выраженным уравнениями (2.28) и (2.30). Исключением являются электросварочные работы. При производстве этих работ интенсивность пылевыведения и удельное пылевыведение описываются уравнениями (2.28) и (2.30) при изменении скорости вентиляци-

онной струи от 0 до 0,7 м/с. При больших скоростях воздушного потока интенсивность пылевыведения достигает своего максимума, и ее значение не зависит от скорости. Для этого участка справедливо соотношение

$$F = F_{\max} = \text{const.} \quad (2.32)$$

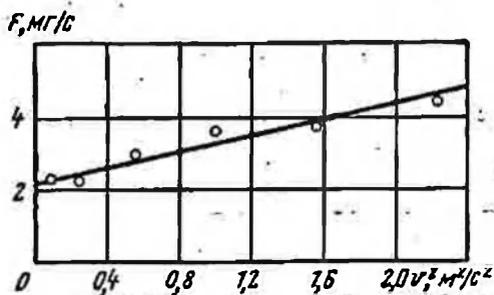


Рис. 2.3. График зависимости интенсивности пылевыведения F при бурении шпуров от квадрата скорости вентиляционной струи v^2

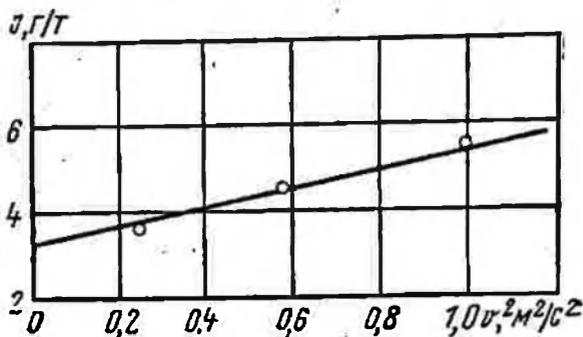
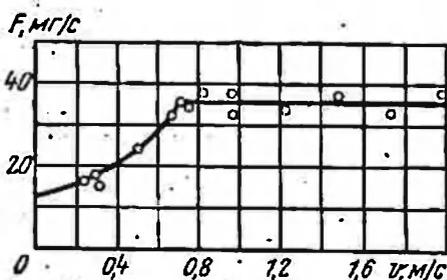


Рис. 2.4. График зависимости удельного пылевыведения J при скреперовании руды от квадрата скорости вентиляционной струи v^2

На рис. 2.5 показано изменение интенсивности пылевыведения в зависимости от скорости вентиляционной струи при производстве сварочных работ электродами ОММ-5. Аналогичные зависимости получены и для других марок электродов. Значения F_0 , J_0 , φ , F_{\max} и J_{\max} и критической скорости вентиляционной струи $v_{\text{кр}}$

Рис. 2.5. График зависимости интенсивности пылевыведения F при электросварочных работах от скорости вентиляционной струи v



при которой достигается максимальное значение интенсивности пылевыведения, для некоторых марок электродов приведены в табл. 2.2.

Значения показателей, характеризующих пылевыведение при других производственных процессах, приведены в табл. 2.3.

Как видно из таблицы, показатели пылевыведения даже для одних и тех же производственных процессов изменяются в широких пределах. Значения их зависят от вида применяемого оборудования, физико-механических свойств горных пород и применяемых средств пылеподавления. Для условий, отличных от приведенных

Таблица 2.2

Марка элект- руды	Интенсив- ность пы- левыделе- ния F_0 , мг/с	Удельное пылевыде- ление J_0 , г/кг	Кoeffи- циент ϕ , с ² /м ²	Критическая скорость $v_{кр}$, м/с	Максимальное значение ин- тенсивности пылевыделе- ния F_{max} , мг/с	Максимальное значение удельного пы- левыделения J_{max} , г/кг
ОММ-Б	12,0	16,5	3,7	0,7	36,1	75
ОЗС-4	7,2	31,0	6,25	0,75	32,8	89
МР-3	7,1	28,0	5,1	0,75	27,4	110
Мелонки	0,2	16,2	6,85	0,75	30,0	79

Таблица 2.3

Иллюстрация производственного процесса	F_0 , мг/с	J_0 , г/т	ϕ , с ² /м ²
Бурение горизонтальных шпуров с про- мышкой перфоратором ПР-30к при расходе воды на промышку 3—3,5 л/мин:			
Ломовский рудник, коэффициент кре- пости пород $f=14+16$	0,9—2,1	—	0,5—0,9
Березовский рудник, $f=10+14$	1,2—2,0	—	0,4—1,0
Бурение восстающих шпуров с промышкой телескопным перфоратором ТП-45 при рас- ходе воды на промышку 5—6, л/мин:			
Ломовский рудник, $f=14+16$	4,9	—	0,7
Березовский рудник, $f=10+14$	2,5—3,6	—	0,5—0,8
Скреперная доставка увлажненной руды:			
Ломовский рудник, средняя влажность руды после орошения $P=5,3\%$	8	0,46	1,5
Березовский рудник, $P=5,8\%$	10	0,5	0,92
Шахта «Сарановская-Рудная» п. о. «Уралруда», $P=5,8\%$	9,8	0,31	0,19
Люковая погрузка увлажненной руды:			
Дегтярский рудник, влажность руды $P=5,6\%$	18,7	0,23	0,25
Березовский рудник, $P=5,8\%$	24	0,32	0,3
Погрузка увлажненной руды погрузочно- доставочной машиной МПДН-1:			
Березовский рудник, $P=5,4\%$	6,8	—	1,15
Доставка увлажненной руды ($P=5,4\%$) самоходной машиной МПДН-1М по выра- ботке с площадью поперечного сечения $S=6,5 \text{ м}^2$ и длиной 30 м:			
при предварительном увлажнении сте- нок выработки	0,7—1,2	—	1,7—1,8
без орошения стенок выработки	0,95—1,45	—	4,0

в табл. 2.3, значения показателей F_0 и ϕ определяют эксперимен-
тальным путем. Для этого по общепринятой методике находят зна-
чения интенсивность пылевыделения F_1 и F_2 при двух скоростях
движения воздуха в выработке v_1 и v_2 .

При известных F_1 , F_2 , v_1 и v_2 значения F_0 и φ могут быть рассчитаны по формулам

$$F_0 = (F_2 v_2^2 - F_1 v_1^2) / (v_2^2 - v_1^2); \quad (2.33)$$

$$\varphi = (F_2 - F_1) / (F_2 v_2^2 - F_1 v_1^2). \quad (2.34)$$

Значение J_0 при известном значении F_0 рассчитывается в соответствии с зависимостью (2.29).

2.3. Влияние параметров свободной струи на интенсивность пылевыведения в тупиковой выработке

Основными источниками непрерывного пылевыведения в тупиковых забоях являются процессы бурения и уборки породы. В некоторых случаях в них могут производиться и сварочные работы.

В отличие от сквозных выработок тупиковые забои проветриваются свободными турбулентными струями. Поэтому интенсивность пылевыведения, зависящая от подвижности воздушных масс, будет зависеть от параметров свободной струи, проветривающей тупиковую часть выработки.

Анализ экспериментальных данных позволил установить, что с увеличением скорости воздуха у забоя возрастает интенсивность образования аэрозолей при всех пылевыведяющих процессах. При этом приращение интенсивности пылевыведения прямо пропорционально среднему динамическому напору ядра постоянной массы у груди забоя.

По аналогии с (2.28) зависимость интенсивности пылевыведения (мг/с) в тупиковой выработке от скорости вентиляционной струи у забоя можно выразить в виде уравнения

$$F = F_0 (1 + \varphi U_{cp}^2), \quad (2.35)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, мг/с; φ — размерный коэффициент, определяемый опытным путем, $\text{с}^2/\text{м}^2$; U_{cp} — средняя скорость ядра постоянной массы у груди забоя, м/с.

Известно, что средняя скорость ядра постоянной массы в любом сечении струи пропорциональна осевой скорости

$$U_{cp} = a_1 U_m, \quad (2.36)$$

где U_m — осевая скорость свободной струи, м/с; a_1 — коэффициент пропорциональности.

Подставляя в уравнение (2.35) значение U_{cp} , получим

$$F = F_0 (1 + \varphi a_1^2 U_m^2). \quad (2.37)$$

Так как значение a_1 не зависит от внешних причин и во всех случаях остается постоянным, уравнение (2.37) можно записать в виде

$$F = F_0 (1 + \varphi' U_m^2), \quad (2.38)$$

где

$$\varphi' = a_1^2 \varphi. \quad (2.39)$$

Эксперименты, выполненные в модели тупиковой выработки, показали, что по мере удаления конца вентиляционной трубы от забоя в пределах дальнобойности свободной струи значение φ' возрастает (рис. 2.6). Зависимость значения φ' от расстояния между

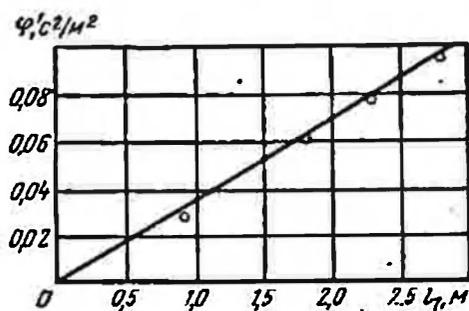


Рис. 2.6. График зависимости коэффициента φ' от расстояния вентиляционного трубопровода до забоя l_1

концом вентиляционной трубы и забоем может быть выражена линейным уравнением вида

$$\varphi' = \psi l_1, \quad (2.40)$$

где ψ — опытный коэффициент, зависящий от вида производственного процесса, применяемых оборудования и средств пылеподавления и физико-механических свойств горных пород, $\text{с}^2/\text{м}^3$; l_1 — расстояние от груди забоя до конца трубопровода, м.

Возрастание значения φ' с удалением трубы от забоя указывает на повышение интенсивности пылевыделения. Это объясняется тем, что при прочих равных условиях с увеличением расстояния свободная струя получает наибольшее развитие и подвижность воздушных масс в забое повышается, что способствует переходу большего числа твердых частиц во взвешенное состояние. Данная закономерность справедлива в пределах дальнобойности свободной струи.

Значение осевой скорости свободной струи у груди забоя U_m зависит от скорости выхода воздуха из выходного отверстия вентиляционного трубопровода U_0 , диаметра выходного отверстия d , удаления конца трубопровода от забоя l_1 и коэффициента структуры свободной струи a . Взаимосвязь между этими величинами выражается зависимостью

$$U_m = 0,816 U_0 / (2a l_1 / d + 0,417). \quad (2.41)$$

Для круглой свободной струи коэффициент структуры $a = 0,06 \div 0,08$.

Подставив в уравнение (2.38) значения φ' и U_m из выражений (2.40) и (2.41), получим

$$F = F_0 \{ 1 + \psi l_1 [0,816 / (2a l_1 / d + 0,417)]^2 U_0^2 \}. \quad (2.42)$$

Выражая интенсивность пылевыделения через удельное пылевыделение, получим

$$J = J_0 [1 + \psi I_1 [0,816/(2aI_1/d + 0,417)]^2 U_0^2]. \quad (2.43)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением скорости ядра постоянных масс. одновременно с возрастанием интенсивности пылевыделения изменяется дисперсный состав аэрозоля. Уменьшается процентное содержание фракции с размером частиц менее двух микрон и возрастает содержание фракций с более крупными частицами.

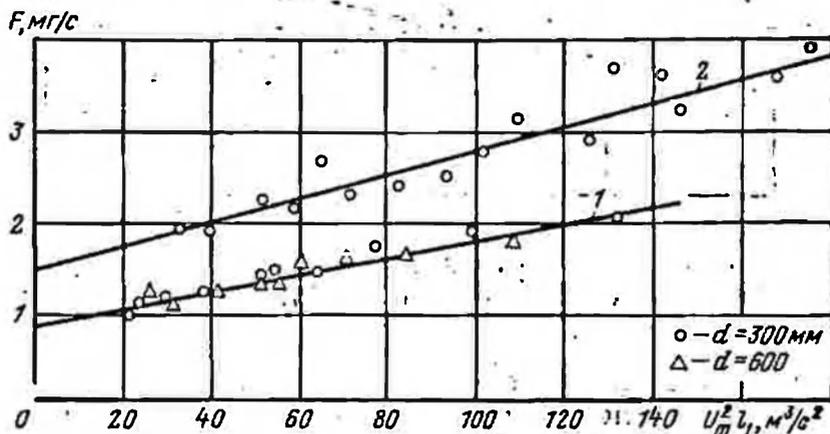


Рис. 2.7. График зависимости интенсивности пылевыделения F от комплексного параметра $U_m^2 l_1$:

1 и 2 — соответственно при бурении одним и двумя перфораторами

Для проверки справедливости уравнений (2.42) и (2.43) и определения значений F_0 , J_0 и ψ для различных процессов проходческого цикла были проведены широкие экспериментальные исследования в производственных условиях. Эксперименты заключались в определении интенсивности пылевыделения при различных режимах проветривания. В процессе опытов изменяли расходы воздуха, расстояние от конца вентиляционного трубопровода до забоя, диаметр вентиляционной трубы.

На рис. 2.7 и 2.8 приведены типичные графики, характеризующие зависимость интенсивности пылевыделения от комплексного параметра $U_m^2 l_1$.

Из графиков видно, что экспериментальные точки, полученные при разных значениях расхода воздуха, диаметра вентиляционного трубопровода и удаления его выходного отверстия от забоя, образуют прямые, описываемые уравнениями (2.42) и (2.43). Ординаты точек пересечения полученных прямых с осью ординат равны интенсивности пылевыделения при отсутствии проветривания F_0 (см. рис. 2.7) или удельному пылевыделению при отсутствии движения воздуха J_0 (см. рис. 2.8). Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, деленный на F_0 или на J_0 , численно равен коэффициенту ψ . Значения F_0 , J_0 и ψ при бурении шпуров и уборке гор-

ной массы для некоторых рудников Урала и геологоразведочных штолен Восточной Сибири приведены в табл. 2.4.

Для условий, отличающихся от приведенных в таблице, показатели пылевыведения должны определяться экспериментальным пу-

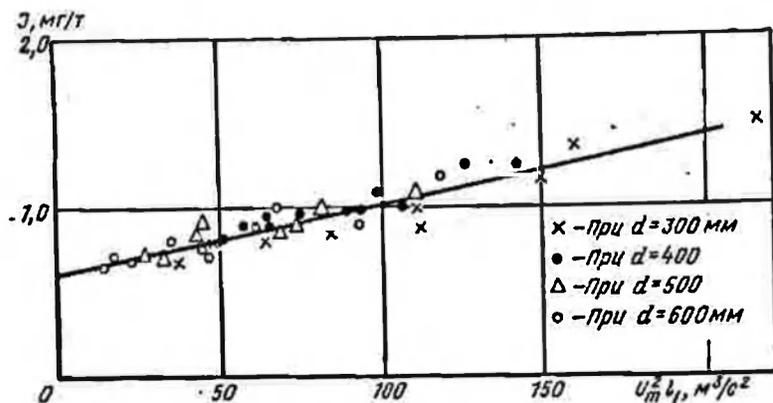


Рис. 2.8. График зависимости удельного пылевыведения J при уборке забоя машиной ППН-1С от комплексного параметра $U_m^2 l_1$

тем. Как и в сквозных выработках, для этого достаточно определить значения интенсивности пылевыведения F_1 и F_2 при двух режимах проветривания. Режим проветривания можно изменить либо путем изменения скорости выхода воздуха из трубопровода, либо путем изменения расстояния выходного отверстия трубопровода от забоя в пределах дальности свободной струи.

Значения F_0 и ψ рассчитывают по следующим формулам:

$$F_0 = (F_1 B_2 - F_2 B_1) / (B_2 - B_1); \quad (2.44)$$

$$\psi = (F_2 - F_1) / (F_1 B_2 - B_1 F_2), \quad (2.45)$$

где

$$B_1 = l_1' [0,816 / (2al_1/d + 0,417)]^2 U_0^2; \quad (2.46)$$

$$B_2 = l_1 [0,816 / (2al_2/d + 0,417)]^2 U_0^2; \quad (2.47)$$

Здесь l_1, l_1', U_0, U_0' — соответственно удаления конца вентиляционного трубопровода от забоя и скорости выхода воздуха из трубопровода, для которых определены значения интенсивности пылевыведения F_1 и F_2 .

При ведении электросварочных работ в тупиковых выработках интенсивность пылевыведения с увеличением динамического воздействия вентиляционной струи, как и в сквозных выработках, вначале растет, затем, достигнув максимального значения, остается постоянной. Это объясняется тем, что в отличие от других процессов при электросварочных работах образуются однородные тонкодисперсные частицы, легко переходящие во взвешенное состояние. При этом общее число частиц значительно меньше, чем

Таблица 2.4

Наименование производственного процесса	F_0 , мг/с	J_0 , г/т	ψ , с ² /м ²
Бурение шпуров с промывкой одним ручным перфоратором ПР-30к:			
Ломовский рудник, коэффициент крепости буримых пород $f=14\div 16$, расход воды на промывку 3 л/мин	0,9—2,1	—	0,009—0,01
Березовский рудник, $f=10\div 14$, расход воды на орошение 3 л/мин	1,2—2,0	—	0,01—0,015
Бурение шпуров с промывкой двумя перфораторами ПР-30к:			
Дегтярский рудник, $f=14$, расход воды на промывку 3 л/мин	1,5	—	0,0094
Березовский рудник, $f=10\div 14$, расход воды на промывку 3 л/мин	1,5—2,6	—	0,01—0,015
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 5, температура пород — 3°С, расход воды на промывку 1,5 л/мин	3,3	—	0,0068
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 1, температура пород — 0,2°С, расход воды на промывку 1,5 л/мин	2,6	—	0,0065
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 5, температура пород — 3°С, промывка раствором хлористого натрия, расход раствора 1,5 л/мин	1,9	—	0,0032
Уборка забоя машиной ППН—1С:			
Ломовский рудник с предварительным увлажнением стенок выработки и горной массы водой, расход воды 150 л на цикл	0,9	0,085	0,0023
то же, Дегтярский рудник	0,9	0,085	0,0023
то же, Березовский рудник	0,8	—	0,015
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 5, температура пород — 3°С, расход воды на орошение стенок и горной массы 150 л на цикл	4,4	0,595	0,008
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 1, температура пород — 0,2°С, расход воды 150 л на цикл	3,5	0,495	0,0075
Бурун-Холбинское месторождение, штольня № 1, температура пород — 3°С, орошение 3%-ным раствором хлористого натрия, расход раствора 150 л на цикл	1,7	0,28	0,004

при процессах, связанных с разрушением, погрузкой и разгрузкой горных пород.

Значения коэффициента ψ , характеризующего приращение интенсивности пылевыделения при увеличении динамического воздействия свободной вентиляционной струи, и критические значения параметра U_{ml}^2 , при которых интенсивность пылевыделения дос-

стигает максимального значения и становится постоянной, для некоторых марок электродов приведены ниже.

Марка электрода	ОММ-5	ОЗС-4	МР-3	Меловые
$\psi, \text{с}^2/\text{м}^3$	0,12	0,2	0,145	0,21
$U^2_{\text{т.1}}, \text{м}^3/\text{с}^3$	15,5	17,7	19,7	18,0

2.4. Интенсивность пылевыведения при одновременной работе нескольких бурильных машин

Из данных, приведенных в табл. 2.4 и на рис. 2.7, видно, что интенсивность пылевыведения при работе двух перфораторов в забое меньше удвоенной интенсивности пылевыведения при работе одного перфоратора.

Это объясняется тем, что они работают одновременно не все время, так как в процессе бурения неизбежны остановки для смены буров, перемещения их на новое место и т. п.

Введем обозначение

$$F_{0,}/(2F_0) = K_{\text{од}}, \quad (2.48)$$

где $F_{0,}$ — средняя интенсивность пылевыведения при работе двух перфораторов, мг/с; F_0 — интенсивность пылевыведения при работе одного перфоратора, мг/с; $K_{\text{од}}$ — коэффициент одновременности работы перфораторов.

Если принять интенсивность пылевыведения перфораторов одинаковой и равной F_0 , то средневзвешенная общая интенсивность пылевыведения будет равна

$$F_{0,} = (2F_0 t_2 + F_0 t_1)/(t_2 + t_1), \quad (2.49)$$

где t_2 — время одновременной работы двух перфораторов; t_1 — время бурения одним перфоратором.

Из соотношения (2.48) следует

$$F_{0,} = 2F_0 K_{\text{од}}. \quad (2.50)$$

Приравняв правые части выражений (2.49) и (2.50) и решив полученное уравнение относительно $K_{\text{од}}$, получим

$$K_{\text{од}} = (2t_2 + t_1)/(2(t_1 + t_2)). \quad (2.51)$$

Учитывая, что $t_1 + t_2 = t_{\text{об}}$ ($t_{\text{об}}$ — общее время бурения комплекта шпуров двумя перфораторами), приведем выражение (2.51) к виду

$$K_{\text{од}} = (2t_{\text{об}} - t_1)/(2t_{\text{об}}). \quad (2.52)$$

Результаты хронометражных наблюдений за работой бурильщиков в течение смены, проведенные в 5 забоях (общее время бурения шпуров двумя перфораторами $t_{\text{об}}$, время бурения одним перфоратором t_1), показаны ниже.

$t_{\text{об}}, \text{мин}$	112	105	121	116	109
$t_1, \text{мин}$	51	29	37	38	27
$K_{\text{од}}$	0,77	0,86	0,85	0,83	0,88

Приведенные значения коэффициента одновременности $K_{од}$ рассчитаны по формуле (2.52). Среднее значение $K_{од}$ для двух перфораторов по результатам хронометражных наблюдений составляет 0,84.

По аналогии с уравнением (2.50) взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения в непроветриваемом забое при работе i перфораторов F_{0_i} и интенсивностью пылевыведения при работе одного перфоратора F_0 можно выразить уравнением

$$F_{0_i} = iF_0K_{од} \quad (2.53)$$

Значение коэффициента одновременности $K_{од}$, входящего в уравнение (2.53), зависит от числа перфораторов, работающих в забое, и может быть рассчитано по формуле

$$K_{од} = i^{-0,25} \quad (2.54)$$

Значения коэффициента ψ , характеризующего приращение интенсивности пылевыведения при увеличении динамического воздействия вентиляционной струи в тупиковом забое, от числа работающих бурильных молотков практически не зависят (см. табл. 2.4).

2.5. Влияние влажности горной массы на интенсивность пылевыведения при скреперовании и погрузке руды

При выпуске руды из рудовыпускных воронок, скреперной доставке, погрузочно-разгрузочных работах в атмосферу выработки поступает главным образом пыль, образованная ранее и содержащаяся в мелких фракциях руды.

Количество дисперсных частиц, перешедших во взвешенное состояние, зависит не только от динамического воздействия воздушного потока, но и от степени измельчения и влажности горной массы. При увеличении влажности пылевые частицы адсорбируют на своей поверхности влагу, слипаются, образуя конгломераты. Влажные частицы прилипают к крупным кускам. Все это затрудняет переход их во взвешенное состояние.

Взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения и скоростью вентиляционной струи, как было установлено выше, описывается уравнением (2.28).

Исследованиями установлено, что с увеличением влажности при погрузке и скреперовании горной массы меняется значение входящих в это уравнение F_0 и ψ .

При погрузке руды в вагонетки вибропитателем (шахта «Капитальная» № 2 Дегтярского рудника):

влажность руды P , %	0,8	1,8	2,8	4,3	5,6
F_0 , мг/с	165	91	51	36,5	18,7
ψ , с ² /м ²	0,79	0,61	0,44	0,30	0,25

При скреперной доставке руды (шахта «Сарановская-Рудная»):

влажность руды P , %	0,6	1,2	2,3	4,0	5,8
F_0 , мг/с	104	80	57	27,6	9,8
φ , с ² /м ²	0,67	0,55	0,44	0,26	0,19

Чем выше влажность руды, тем меньше значения F_0 и φ .

На основании теоретических исследований были получены следующие зависимости F_0 и φ от влажности горной массы:

$$F_0 = F_{0e} \exp[-a(P - P_e)]; \quad (2.55)$$

$$\varphi = \varphi_e \exp[-b(P - P_e)], \quad (2.56)$$

где F_{0e} и φ_e — соответственно интенсивность пылевыведения в непроветриваемой выработке и коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения при возрастании скорости вентиляционной струи для неувлажненной руды; P_e — естественная влажность руды, %; a и b — экспериментальные коэффициенты, характеризующие склонность руды и пыли к смачиванию.

Заменив в выражении (2.28) F_0 и φ их значениями из (2.55) и (2.56), получим уравнение, описывающее зависимость пылевыведения при скреперных работах от влажности горной массы и скоростью вентиляционной струи

$$F = F_{0e} \exp[-a(P - P_e)] \{1 + \varphi_e v^2 \exp[-b(P - P_e)]\}. \quad (2.57)$$

Результаты экспериментов по определению интенсивности поступления пыли в рудничную атмосферу при скреперной доставке и погрузке руды вибропитателем при разных значениях скорости вентиляционной струи и влажности руды приведены на рис. 2.9. Экспериментальные точки во всех случаях удовлетворительно расположились около кривых, построенных по уравнению (2.57).

Учитывая, что между интенсивностью пылевыведения и удельным пылевыведением существует зависимость (2.29), можно доказать, что

$$J = J_{0e} \exp[-a(P - P_e)] \{1 + \varphi_e v^2 \exp[-b(P - P_e)]\}, \quad (2.58)$$

где J — удельное пылевыведение в проветриваемой выработке при влажности руды P (%), мг/т; J_{0e} — удельное пылевыведение в непроветриваемой выработке при естественной влажности руды, мг/т.

Значения коэффициентов a и b , характеризующих склонность руды и пыли к смачиванию, для Дегтярского рудника составляют: $a=0,48$; $b=0,26$; для условий шахты «Сарановская-Рудная» п. о. «Уралруда»: $a=0,42$; $b=0,25$.

Таким образом, увеличивая влажность отбитой горной массы, можно добиться значительного уменьшения интенсивности пылевыведения при скреперных и погрузочно-разгрузочных работах (рис. 2.10).

Увеличение влажности руды от 0,8 до 5,6 % снижает интенсивность пылевыведения при погрузке в 12—20 раз.

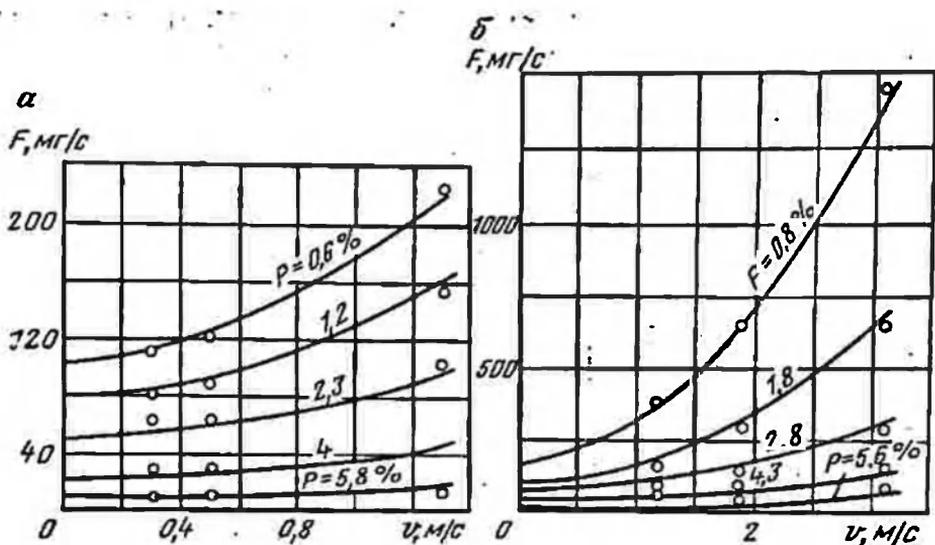


Рис. 2.9. График зависимости интенсивности пылевыведения F от скорости воздушного потока v для руд разной влажности P :

а — при скреперовании; б — при погрузке руды вибропитателем

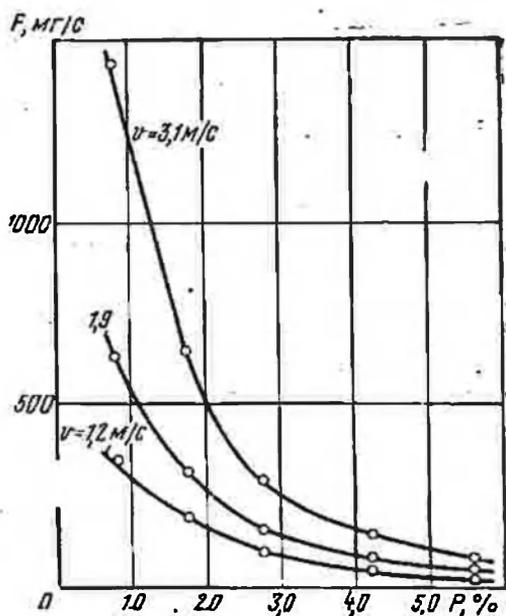


Рис. 2.10. График зависимости интенсивности пылевыведения F при люковой погрузке руды от ее влажности P

2.6. Интенсивность пылевыведения в условиях многолетней мерзлоты

Известно, что количество дисперсных частиц, образующихся при разрушении горных пород, зависит от их крепости и хрупкости. Чем выше показатели крепости и хрупкости породы, тем больше дисперсных частиц образуется при ее разрушении. Крепость горной породы прямо пропорциональна пределу прочности ее на сжатие; хрупкость характеризуется отношением предела прочности породы при растяжении к пределу прочности ее на сжатие.

Чем больше значение этого отношения, тем более хрупкая порода [6]. При понижении температуры мерзлые породы становятся более хрупкими. Интенсивность пылевыведения при их разрушении увеличивается.

На рис. 2.11 приведены результаты экспериментальных исследований по определению интенсивности пылевыведения при бурении шпуров по мерзлым породам, имеющим разную температуру, выполненных в разведочных штольнях Удоканского медного место-

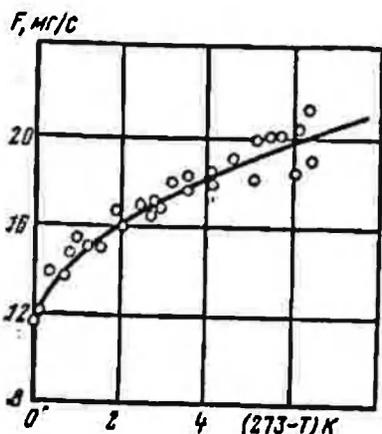
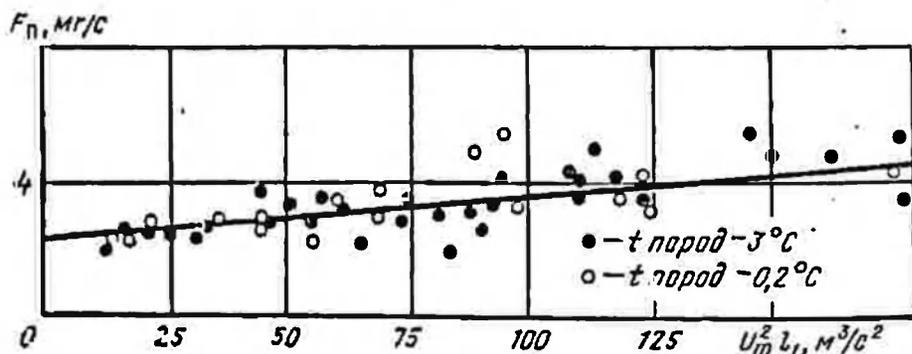


Рис. 2.11. График зависимости интенсивности пылевыведения F от температуры мерзлых пород $(273-T)$ К

Рис. 2.12. График зависимости приведенной интенсивности пылевыведения F_n от комплексного параметра $U_m^2 l_1$



рождения и золоторудных месторождений Восточных Саян. Бурение шпуров производили двумя перфораторами ПР-30к с нормальным комплектом буров, имеющих коронку долотчатой формы диаметром 42 мм. Расход промывочной жидкости составлял 1,5 л/мин.

Из приведенного графика видно, что при понижении температуры мерзлых пород интенсивность пылевыведения растет. Аналогичные зависимости получены при погрузке породы и взрывных работах.

Взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения F_t (мг/с) и температурой мерзлых пород T_n (К) выражается формулой

$$F_t = F(1 + \alpha_t \sqrt{273 - T_n}), \quad (2.59)$$

где F — интенсивность пылевыведения в зоне положительных температур, мг/с; α_t — коэффициент, зависящий от характера рабочего процесса $K^{-0.5}$.

Следует иметь в виду, что уравнение (2.59) справедливо только при отрицательных температурах горных пород. При положительных интенсивность пылевыведения практически не зависит от температуры пород.

Для проветриваемых выработок, проводимых в зоне многолетней мерзлоты, определение интенсивности источников непрерывного пылевыведения с учетом (2.42) должно осуществляться по формуле

$$F_t = F_0 \left[1 + \psi l_1 \left(\frac{0,816}{2\alpha_t l_1 d + 0,417} \right)^2 U_0^2 \right] (1 + \alpha_t \sqrt{273 - T_{\text{п}}}). \quad (2.60)$$

С целью проверки справедливости данного уравнения результаты исследований интенсивности пылевыведения при бурении шпуров и погрузке породы, полученные при разных параметрах свободной струи и температурах горных пород, были обработаны в координатах $F_{\text{п}} = F_t / (1 + \alpha_t \sqrt{273 - T_{\text{п}}})$ и $U^2_m l_1$ (рис. 2.12). Экспериментальные точки расположились около прямой, построенной по уравнению (2.60). Аналогичный график получен при уборке горной массы из забоя. Выполненные эксперименты позволили определить значение коэффициента α_t , входящего в уравнение (2.60). При бурении $\alpha_t = 0,29 K^{-0.5}$, при погрузке $\alpha_t = 0,22 K^{-0.5}$. Средние значения F_0 и ψ приведены ниже.

	F_0 , мг/с	ψ , с ² /м ⁴
Бурение шпуров двумя перфораторами ПР-30к с промывкой водой	2,25	0,0063
То же, с промывкой шпуров 3%-ным раствором хлористого натрия	1,3	0,0032
Уборка забоя ППН-1С с предварительным увлажнением породы водой	3,0	0,0077
Уборка забоя ППН-1С с непрерывным орошением породы 3%-ным раствором хлористого натрия	1,25	0,0041

3. ОСАЖДЕНИЕ И СДУВАНИЕ ПЫЛИ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

3.1. Общие сведения о переносе частиц турбулентным потоком

Характер движения пылевых частиц в горных выработках определяется спектром пульсаций, характерных для турбулентных потоков.

В турбулентных потоках на среднее движение накладываются пульсационные колебания, имеющие самые разнообразные амплитуды и направления.

Турбулентные пульсации характеризуются величиной скорости и расстояниями, на протяжении которых пульсации претерпевают заметные изменения. Эти расстояния называются масштабом движения. Самые быстрые пульсации имеют самый большой масштаб движения. Так, например, при турбулентном движении в трубе наибольший масштаб пульсаций совпадает с диаметром трубы, а скорость пульсаций — с максимальным значением скорости в центре трубы. В таких крупномасштабных пульсациях заключена основная часть кинетической энергии турбулентного движения.

Наряду с крупномасштабными пульсациями в турбулентном потоке имеют место пульсации меньшего масштаба. Хотя число таких пульсаций велико, они содержат лишь малую часть кинетической энергии потока.

У крупномасштабных пульсаций число Рейнольдса достаточно велико и вязкие силы фактически не играют сколько-нибудь существенной роли. Такое движение происходит без диссипации энергии. При некоторых значениях масштаба движения ($\lambda = \lambda_0$) число Рейнольдса становится равным примерно единице. В этой области вязкие силы начинают существенно влиять на движение жидкости. Пульсационные движения в этом случае сопровождаются диссипацией энергии.

С увеличением скорости осредненного движения пропорционально увеличиваются пульсационные скорости. В состоянии развитой турбулентности в среде существуют пульсации с широким диапазоном масштабов и скоростей.

Пульсации крупного масштаба увлекают частицы вместе с прилегающими к ним слоями среды, перенося их как одно целое. Самые мелкомасштабные движения среды не могут вовлечь в свое движение частицы, и по отношению к ним частица ведет себя как неподвижное тело. Пульсации промежуточного масштаба увлекают в свое движение частицу не полностью. Отставание скорости движения частицы от скорости среды будет тем больше, чем большим ускорением будут обладать соответствующие пульсации. Пульсационная скорость частиц возрастает значительно медленнее, чем пульсационная скорость среды.

Н. А. Фукс приближенно оценил степень увлечения частиц турбулентными пульсациями для аэродинамической трубы и пришел к выводу, что частицы с радиусом 30 мкм и плотностью, равной 1, практически полностью увлекаются пульсациями масштаба $\lambda \geq \lambda_0$.

Поскольку такие пульсации заключают в себе основную долю кинетической энергии турбулентного движения и осуществляют перенос субстанции, то, по-видимому, не будет большой погрешности в допущении, что турбулентная диффузия частиц в развитом турбулентном потоке вдали от стенок равна турбулентной диффузии молекул газа.

Для оценки влияния процессов осаждения аэрозоля и сдувания частиц со стенок выработок потоком воздуха важно знать закон распределения твердых частиц в сечении потока. Задача о верти-

кальном распределении частиц в горизонтальном потоке с учетом действия гравитационного поля решена Н. А. Фуксом. Рассматривая равновесие процессов осаждения частиц под действием силы тяжести и перехода их в верхние слои потока под влиянием турбулентной диффузии, он получил следующее уравнение распределения частиц по высоте:

$$\ln(n_z/n) = -v_e z/D_t, \quad (3.1)$$

где n — концентрация частиц у дна канала, мг/м³; n_z — концентрация на высоте z , мг/м³; z — высота канала, м; v_e — скорость осаждения частиц в спокойном воздухе, м/с; D_t — коэффициент турбулентной диффузии, м²/с.

$$D_t = 0,044\nu \text{Re}^{0,75}, \quad (3.2)$$

где Re — число Рейнольдса; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

В условиях угольных шахт уравнение (3.1) проверено А. И. Ксенофоновой и А. С. Бурчаковым. Результаты их экспериментальных исследований хорошо согласуются с расчетными данными, полученными по этому уравнению.

Из уравнений (3.1) и (3.2) следует, что

$$n_z = n \exp[-v_e z/(0,0044\text{Re}^{0,75})]. \quad (3.3)$$

Расчеты, выполненные по уравнению (3.3) для выработки площадью поперечного сечения 8 м², показывают, что при скорости воздушного потока 0,25—0,3 м/с и диаметре кварцевых частиц до 5 мкм концентрация аэрозоля по высоте остается практически неизменной. Экспериментальные исследования, выполненные В. В. Нединым и О. Д. Нейковым, подтверждают справедливость данных расчетов [15].

Следовательно, кварцевые частицы с диаметром до 5 мкм в таких потоках полностью увлекаются вихревыми массами, и действие силы тяжести в удалении от стенок выработок пренебрежимо мало по сравнению с действием аэродинамических сил.

3.2. Осаждение пыли в шахтных выработках

В шахтах по мере удаления от источников пылевыведения запыленность воздуха уменьшается. Это явление объясняется осаждением частиц пыли на бока, кровлю и почву выработок. Наблюдения показывают, что пыль осаждается на поверхности выработок как при малых, так и при больших скоростях вентиляционной струи. Так, например, в рудных шахтах имеет место накопление пыли в вентиляционных выработках, где скорость движения воздуха достигает 5—7 м/с. Осаждение пылевых частиц в турбулентном потоке возможно под влиянием гравитационных сил, диффузионных процессов и инерционных сил. Анализ теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в п. 3.1, показывает, что в турбулентном потоке на достаточном удалении от стенок частицы полностью увлекаются пульсациями и их перемещение в

направлении течения и по сечению потока определяется главным образом динамическими параметрами потока. Гравитационные силы на перемещение мелкодисперсных частиц влияния почти не оказывают. Подсчитано, что в горизонтальной выработке при скорости вентиляционной струи более 0,2 м/с осаждение пыли с размерами частиц менее 10 мкм под действием гравитационных сил практически исключено [15].

При полном перемешивании и увлечении вихревыми массами частицы, перемещаясь поперек потока, достигают пристенного слоя и при определенных условиях могут переходить в этот слой. В непосредственной близости от стенок имеется ламинарный подслой толщиной $\delta_{л}$. Относительно механизма диффузии внутри ламинарного подслоя существуют две точки зрения: одна из них принадлежит Прандтлю и Тейлору, вторая — Ландау и Левичу.

Согласно первой точке зрения внутри ламинарного подслоя передача вещества происходит исключительно за счет молекулярной диффузии. По Ландау и Левичу, турбулентные пульсации проникают в ламинарный подслой, затухая лишь у самой стенки. Коэффициент турбулентной диффузии вблизи стенки резко уменьшается. На расстоянии от стенки, равной $\delta_{л}$, его значение становится равным значению коэффициента молекулярной диффузии.

Н. А. Фукс, произведя соответствующие расчеты, нашел, что по гипотезе Прандтля и Тейлора скорость диффузионного осаждения пропорциональна коэффициенту броуновской диффузии в первой степени, по Ландау и Левичу — в степени 0,75. Это означает, что с уменьшением размеров частиц эффективность осаждения должна возрастать, так как коэффициент диффузии мелких частиц выше, чем крупных.

Однако экспериментальные данные по осаждению частиц на стенках трубки свидетельствуют как раз об обратном, т. е. в действительности эффективность осаждения крупных частиц выше, чем мелких.

Аналогичные явления наблюдаются и в шахтных выработках. Дисперсный анализ взвешенной пыли показывает, что в первую очередь осаждаются более крупные частицы, а субмикроскопические частицы находятся во взвешенном состоянии значительно дольше. Следовательно, диффузионное осаждение частиц в пределах ламинарного пограничного слоя не может быть преобладающим.

Инерционное осаждение частиц в шахтных выработках может быть двух видов: осаждение на препятствиях при обтекании их потоком воздуха и осаждение под действием пульсаций турбулентного потока.

При встрече с препятствием линии тока начинают изгибаться. Частицы же вследствие инерции стремятся сохранить первоначальное направление движения и попадают в препятствие. Установлено, что если число Стокса меньше некоторого критического значения, равного примерно 0,1, осаждение частиц на препятствия не происходит [11].

В горных выработках размеры выступов шероховатостей колеблются от 0,05 до 0,3 м. При применении гидрообеспыливания основное количество дисперсных частиц имеет размеры менее 5 мкм. Скорость воздушного потока в очистных выработках согласно ПБ не превышает 4 м/с. Соответствующие расчеты показывают, что первый вид инерционного осаждения не может оказать решающего влияния на процесс выпадения частиц из шахтных вентиляционных потоков.

Преобладающим в турбулентных потоках является инерционное осаждение частиц под действием турбулентных пульсаций. Механизм его заключается в следующем. За счет турбулентной диффузии частицы переносятся из центральной части потока к границам и проникают в вязкий ламинарный подслой. При изменении направления пульсационной скорости они по инерции проходят некоторое расстояние l_0 и, достигнув стенки, осаждаются на ней. Если частицы не могут дойти до стенки из-за возникновения сил инерции ($l_0 < \delta_L$) они либо будут удаляться от нее, если направление движения не совпадает с направлением силы тяжести, либо приближаться к стенке со скоростью, равной скорости осаждения частиц в спокойном воздухе, если траектория движения их совпадает с направлением силы тяжести. Следовательно, при равномерном распределении тонкодисперсных частиц интенсивность осаждения последних на почву выработок будет выше, чем на кровлю и на боковые стенки. Возможно, что все частицы, перешедшие в ламинарный слой почвы за счет турбулентной диффузии и инерционных сил, полностью осядут под действием силы тяжести. На кровле и на боковых стенках осядет лишь та часть частиц, у которых $l_0 \geq \delta_L$.

3.3. Сдувание в выработках пыли вентиляционной струей

Сдувание пыли происходит при изменении режимов проветривания, когда с увеличением скорости движения воздуха до некоторого критического значения под динамическим воздействием потока начинается унос пыли со стенок выработок. Кроме того, относительно крупные частицы пыли, выпавшие ранее, могут разрушаться под воздействием физико-химических и механических факторов и затем повторно поступать в воздух, образуя аэрозоль.

Большое влияние на взмучивание пыли потоком воздуха оказывает изменение сечения выработки в период технологического процесса. Так, например, в аккумулялирующих выработках масса руды, поступающая из рудовыпускной воронки, уменьшает сечение выработки, создавая повышенную скорость в узком сечении и способствуя срыву ее с поверхности отбитой руды. В откаточных выработках при движении груженых вагонеток навстречу вентиляционному потоку относительная скорость воздушной струи возрастает, что также приводит к срыву пыли с поверхности транспортируемого полезного ископаемого.

Избежать загрязнения воздушного потока повторно сдуваемой пылью можно путем создания таких вентиляционных режимов,

при которых аэродинамические силы, действующие на осевшие ранее пылинки, были бы меньше молекулярных сил притяжения, удерживающих их.

Однако, этот вопрос недостаточно изучен. Опубликованные сведения о скоростях вентиляционной струи, при которых начинается сдувание пыли в горных выработках, весьма разноречивы; приводимые зависимости между величиной уноса пыли с запыленной поверхности и скоростью воздушного потока, не имеют достаточного экспериментального подтверждения.

Более детально изучен вопрос взвешивания твердых частиц потоком жидкости. Но и в этой области нет полной ясности.

Впервые вопрос о механизме взвешивания наносов в речных потоках был поставлен гидравликом Дюпюи, который высказал предположение, что вследствие увеличения усредненной скорости от дна к поверхности с верхней стороны частицы скорость больше, чем с нижней. Так как, согласно уравнению Бернулли большей скорости соответствует меньшее давление, то на частицу, движущуюся в потоке действует некоторая сила, направленная вверх. Эта сила поддерживает частицу во взвешенном состоянии.

По мнению М. В. Великанова, подъемная сила Дюпюи может иметь решающее значение лишь для частичек, расположенных у дна, ибо только для них имеется значительная разность в скоростях сверху и снизу частицы.

Гипотеза Дюпюи возникла в то время, когда вопросы турбулентности в науке еще не ставились и теории подъемной силы не существовало. В настоящее время известно, что в потоке имеет место непрерывное чередование случайных и мгновенных скоростных полей, оказывающих различное динамическое воздействие на донную частичку, причем в одних случаях мгновенная скорость возрастает снизу вверх, в других, наоборот, сверху вниз. Частицы отрываются от дна и поддерживаются во взвешенном состоянии ввиду наличия подъемной силы пульсационных скоростей.

Помимо этих двух факторов в некоторых случаях существенное значение имеет непрерывное вихреобразование у дна потока, которое как правило, сопровождается отрывом от дна вихревых шнуров и движением их вместе с захваченными частицами в основном потоке.

О. В. Хорошев предложил следующее выражение для определения средней скорости потока, при которой начинается трогание частиц:

$$v_{\text{тр}} = 0,62 \sqrt{1/\alpha} \sqrt[3]{vg(\rho_1 - \rho)/\rho}, \quad (3.4)$$

где $v_{\text{тр}}$ — скорость трогания частиц, м/с; α — коэффициент аэродинамического сопротивления трения выработки, Н·с²/м⁴; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; ρ_1 — плотность вещества частиц, кг/м³; ρ — плотность воздуха, кг/м³. Формула (3.4) справедлива при размере частиц $d \leq 11,58 \nu / (D\nu\sqrt{\alpha})$ (D — диаметр выработки, м).

Расчеты, произведенные О. В. Хорошевым по формуле (3.4) для выработок, закрепленных бетоном, показали, что при $\rho_1 = 2500 \div 4000 \text{ кг/м}^3$ и площади поперечного сечения $S = 4 \div 8 \text{ м}^2$, средняя скорость, при которой начинается срыв пыли, находится в пределах 8,5—10 м/с.

В. Н. Воронин, Л. Д. Воронина и А. Д. Багриновский [4] рекомендуют такие режимы проветривания выработок, при которых скорость движения воздушной струи около сильно запыленных поверхностей не превышала бы 0,3 м/с. Эту скорость они считают критической скоростью срыва пыли. Лабораторные эксперименты, выполненные авторами в конической трубе прямоугольного сечения, показали, что срыв кварцовой пыли наступает при скорости 4,5—4,8 м/с. Критические скорости срыва угольной пыли по результатам экспериментальных исследований разных авторов составляют от 2 до 10—12 м/с. Таким образом, в настоящее время нет единого мнения о величине критической скорости, при которой наступает срыв пыли в горных выработках.

При расчете и организации противопылевых вентиляционных режимов, необходимо знать не только критическую скорость, при которой происходит срыв пыли, но и величину уноса ее с запыленной поверхности в зависимости от скорости вентиляционной струи. Этот вопрос изучался В. Н. Ворониным, Л. Д. Ворониной и А. Д. Багриновским. В основу их теоретических выводов положена гипотеза о том, что количество пыли, сдуваемой с единицы площади запыленной поверхности, находится в линейной зависимости от разности скорости воздушного потока и критической скорости, при которой начинается срыв пылевых частиц. Однако, экспериментальные работы, выполненные другими исследователями [7, 10, 12], этого не подтвердили. Зависимость величины уноса пыли с запыленной поверхности от скорости воздушного потока описывается уравнением вида

$$\Phi'_c = a(v - v_k)^b, \quad (3.5)$$

где Φ'_c — величина уноса пыли чистым потоком воздуха, мг/(с·м²); v — скорость движения воздуха, м/с; v_k — критическая скорость, м/с; a и b — экспериментальные постоянные.

Значение b по результатам исследований разных авторов колеблется в пределах от 1,7 до 3.

3.4. Интенсивность осаждения аэрозолей в шахтных выработках

Для однотипных по дисперсному и минеральному составу взвешенных частиц, движущихся в канале постоянного сечения, интенсивность осаждения определяется двумя переменными — концентрацией частиц n_0 и скоростью воздушного потока v . Величина осаждения прямо пропорциональна n_0 и v^x . Для определения значения показателя степени « x » были выполнены экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях.

Лабораторные исследования производились на экспериментальной установке (рис. 3.1), рабочая часть которой представляла собой прямоугольную трубу сечением $0,16 \text{ м}^2$ и длиной 8 м . Для удобства наблюдений одна стенка трубы была выполнена из стекла. Установкой различных видов крепи можно изменять коэффициент аэродинамического сопротивления трубы.

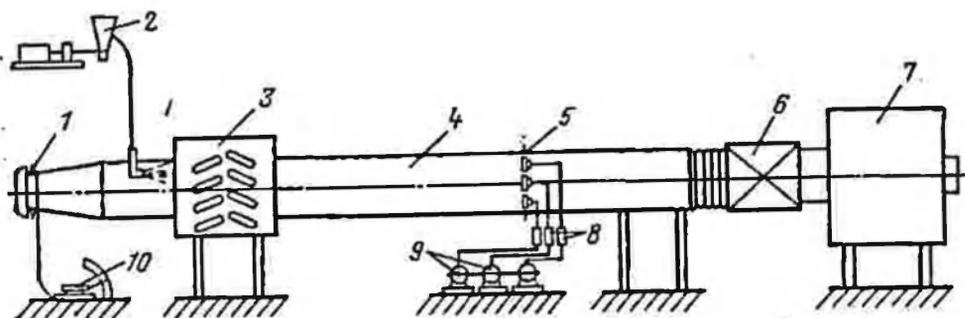


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

1 — коллектор; 2 — пылеплататель; 3 — камера турбулентности; 4 — рабочая часть трубы; 5 — патроны для отбора пылевых проб; 6 — вентилятор; 7 — матерчатый фильтр; 8 — реометры; 9 — воздушодувки; 10 — микроманометр

Для устранения вибрации труба соединялась с вентилятором ВДМ-450 с помощью гибкого трубопровода из прорезиненной ткани. Скорость воздушного потока регулировалась с помощью задвижки.

При выполнении лабораторных исследований определяли интенсивность осаждения пыли по элементам периметра выработки, имитирующим почву, кровлю и боковые стенки выработки. Для этого в рабочей части трубы на расстоянии 10 калибров от камеры турбулентности на боковых стенках, кровле и почве укреплялись пластины, имитирующие поверхность шахтных выработок. Шероховатая поверхность пластины изготовлялась следующим образом. На пластину из белой жести с помощью клея наносился слой пыли. Затем в течение нескольких суток пластина высушивалась и доводилась до постоянной массы. Площадь отдельной пластины была равна 40 см^2 . Воздух, поступающий в трубу, запылялся пылеплатателем, установленным перед камерой турбулентности. Попавшие в поток частицы с помощью специальных воздушомешалок равномерно размещались в камере и поступали в рабочую часть установки. Для экспериментов использовалась пыль класса от 0 до 10 мкм . Частицы размером менее 2 мкм составляли — $70,4 \%$, от 2 до 10 мкм — $29,6 \%$ по массе. Для определения средней запыленности воздушного потока в сечении, где располагались пластины, производился отбор пылевых проб. Опыты производили в диапазоне скоростей $0,6$ — 3 м/с , что соответствовало числам Рейнольдса от $1,8 \cdot 10^4$ до $9 \cdot 10^4$.

Была принята следующая последовательность проведения опытов. Перед каждым опытом пластины взвешивались на весах АДВ-200. Затем их укрепляли на почве, кровле и боковых стенках

рабочей части трубы. Включали вентилятор, пылепитатель, турбулизаторы и воздуходувки для отбора пылевых проб. По истечении 15—30 мин в зависимости от запыленности потока пластины извлекались и взвешивались вторично. Интенсивность осаждения Φ [мг/(с·м²)] рассчитывали по формуле

$$\Phi = (G_2 - G_1)/(St), \quad (3.6)$$

где G_1 и G_2 — масса пластин соответственно до опыта и после опыта, мг; S — площадь пластины, м²; t — время опыта, с.

При одной и той же скорости воздушного потока выполнялась серия опытов, отличающихся один от другого различной запыленностью воздуха. Затем скорость воздушной струи увеличивали, и опыты повторялись.

В шахтных условиях частицы осаждаются на боковых стенках, кровле, почве, отбитой горной массе и т. д. Поверхности осаждения расположены под различными углами к направлению движения потока. В связи с этим опыты проводили в описанной выше последовательности с установкой пластин под углами 0, 20, 40, 60, 80, 90, —90, —80, —60, —40 и —20° по отношению к направлению движения потока.

На рис. 3.2 показана зависимость интенсивности осаждения пыли на почву, боковые стенки и кровлю модели выработки от запыленности воздушного потока при скорости движения 3 м/с и угле встречи с поверхностью осаждения 0°. Аналогичные зависимости получены для других значений скорости воздушного потока и угла встречи его с поверхностью осаждения.

При любом расположении осадительной пластины по отношению к потоку воздуха интенсивность осаждения пыли на почву, кровлю и боковые стенки модели выработки прямо пропорциональна запыленности вентиляционной струи, т. е.

$$\Phi = cn, \quad (3.7)$$

где c — коэффициент, зависящий от скорости воздушного потока, м/с; n — запыленность воздушного потока, мг/м³.

Полагая, что площади поверхностей осаждения, имеющих различную ориентировку по отношению к направлению вентиляционной струи, в натуральных условиях равны между собой, были подсчитаны средние значения коэффициента c для почвы, кровли, боковых стенок и для модели выработки в целом, которые при каждом значении скорости воздушного потока определялись как среднеарифметическое из значений c , полученных для разных углов встречи набегающего потока с поверхностью осаждения. Среднее значение c для выработки в целом рассчитывали по формуле

$$c = (c_n + c_k + 2c_b)/4, \quad (3.8)$$

где c_n , c_k , c_b — соответственно среднеарифметические значения c для почвы, кровли и боковых стенок выработки, м/с.

Средние значения c_n , c_k , c_b и c при различной скорости воздушного потока v для модели выработки приведены ниже.

$v, \text{ м/с}$	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
c_n	0,03	0,032	0,035	0,037	0,037	0,039
c_k	0,005	0,007	0,008	0,010	0,011	0,012
c_b	0,005	0,007	0,008	0,010	0,011	0,012
c	0,011	0,013	0,015	0,016	0,017	0,018

Из приведенных данных следует, что интенсивность осаждения пыли на почву в несколько раз больше, чем на кровлю и боковые

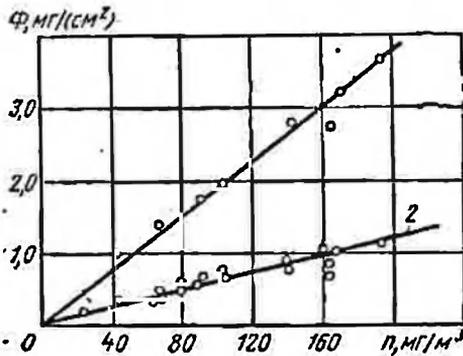


Рис. 3.2. График зависимости интенсивности осаждения пыли Φ от запыленности воздушного потока n :

1 и 2 — соответственно на почве выработки и на кровле и боках ее

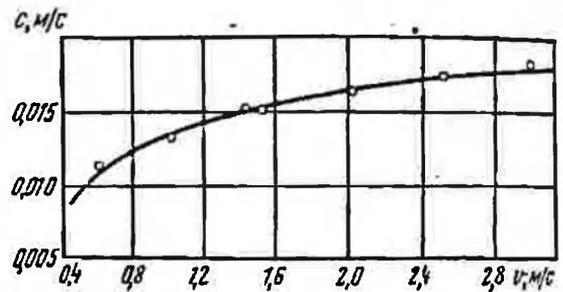


Рис. 3.3. График зависимости коэффициента c от скорости воздушного потока v

стенки модели выработки. Интенсивность осаждения на кровлю и боковые стенки модели одинаковая. Это объясняется тем, что осаждение частиц на кровлю и стенки происходит под действием только инерционных сил, в то время как при осаждении на почву существенное влияние оказывают гравитационные силы.

Зависимость среднего значения c для модели выработки от скорости воздушного потока (рис. 3.3) хорошо описывается уравнением вида

$$c = \epsilon' \sqrt[4]{v}; \quad (3.9)$$

где ϵ' — опытный коэффициент, зависящий от свойств пыли и поверхности осаждения, $(\text{м/с})^{3/4}$;

Подставляя значение c в уравнение (3.7), найдем, что

$$\Phi = \epsilon' n \sqrt[4]{v}. \quad (3.10)$$

Для условий модели $\epsilon' = 0,014 (\text{м/с})^{3/4}$.

Используя полученные зависимости, определим закон изменения запыленности воздуха по длине выработки. Изменение количества пыли в потоке на участке dL

$$dq = q_2 - q_1, \quad (3.11)$$

где q_1 и q_2 — количество пыли, проходящей в единицу времени с потоком воздуха соответственно в начале и в конце участка, мг/с.

$$q_1 = Qn; \quad (3.12)$$

$$q_2 = q_1 - \Phi P dL; \quad (3.13)$$

где P — периметр выработки, м; Q — расход воздуха в выработке, м³/с.

Подставляя значения q_1 и q_2 в уравнение (3.11), с учетом (3.10) получим

$$dq = -\varepsilon' n \sqrt[4]{v} PdL. \quad (3.14)$$

Выразив скорость вентиляционной струи через расход воздуха Q и площадь поперечного сечения выработки S , периметр выработки — через площадь поперечного сечения выработки S , а текущую запыленность воздуха — через количество пыли, проходящее в единицу времени через замерное сечение, q и расход воздуха Q , получим

$$dq/q = 4f_1 \varepsilon' \sqrt[4]{S/Q^3} dL, \quad (3.15)$$

где f_1 — коэффициент формы поперечного сечения выработки.

Решая это уравнение относительно q , получим

$$q = q_0 \exp(-4f_1 \varepsilon' \sqrt[4]{S/Q^3} L), \quad (3.16)$$

где q_0 — количество пыли, проходящей в единицу времени через начальное сечение выработки, мг/с.

Поделив обе части равенства (3.16) на Q , получим закон изменения запыленности воздуха по длине выработки

$$n = n_0 \exp(-4f_1 \varepsilon' \sqrt[4]{S/Q^3} L). \quad (3.17)$$

где n_0 — запыленность воздуха в начале выработки, мг/м³.

Величина коэффициента ε' зависит от диаметра выработки, размеров и плотности пылевых частиц.

При применении средств пылеподавления в воздухе горных выработок в каждом руднике размер частиц и их плотность являются величиной относительно стабильной. Согласно выполненным теоретическим исследованиям диаметр выработки мало влияет на интенсивность осаждения. В диапазоне существующих размеров выработок его влиянием можно пренебречь. Поэтому для каждого рудника можно принимать значение ε' постоянным. Учитывая, что коэффициент формы поперечного сечения для выработок также постоянен, уравнение (3.17) можно привести к виду

$$n = n_0 \exp(-m_1 \sqrt[4]{S/Q^3} L), \quad (3.18)$$

где m_1 — опытный коэффициент, учитывающий свойства пыли и свойства поверхности осаждения, форму поперечного сечения выработки, (м/с)^{3/4}.

$$m_1 = 4f_1 \varepsilon'. \quad (3.19)$$

Для проверки справедливости уравнения (3.18) и определения значения коэффициента m_1 были выполнены исследования в производственных условиях на Высокогорском железном и Пышминском медном рудниках, сущность которых заключалась в определении запыленности воздуха на разных расстояниях от пылеисточника при различных режимах проветривания (рис. 3.4). Экспери-

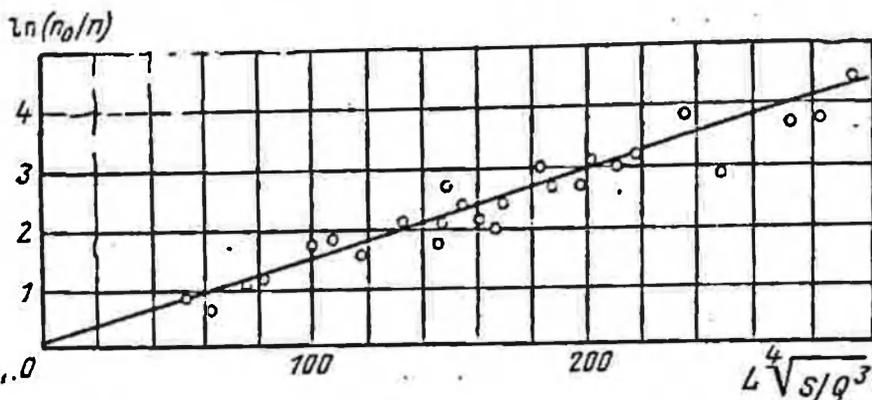


Рис. 3.4. Изменение концентрации пыли в выработке за счет ее осаждения в зависимости от комплексного параметра $L\sqrt[4]{s/q^3}$.

ментальные точки относительно хорошо располагаются около прямой, что подтверждает справедливость уравнения (3.18). Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс численно равен коэффициенту m_1 , значение которого для сухих выработок разных рудников колеблется от 0,02 до 0,03.

Помимо экспериментов, выполненных в выработках, были обработаны данные по запыленности воздуха на различном удалении от источников пылевыведения, полученные пылевентиляционной службой Пышминского рудника в процессе контроля за состоянием рудничной атмосферы.

При анализе данных среднее значение коэффициента m_1 оказалось равным 0,019, т. е. таким же, как и в экспериментальной выработке.

Выполненные исследования показали, что процесс осаждения аэрозолей на поверхности выработок следует учитывать при организации противопылевых вентиляционных режимов в горных выработках.

3.5. Критическая скорость срыва и интенсивность сдувания пыли с запыленной поверхности

На частицу, осевшую в проветриваемой выработке, действуют физико-химические силы молекулярного притяжения и аэродинамические силы потока. В том случае, если аэродинамические силы окажутся больше молекулярных сил притяжения, частица может перейти во взвешенное состояние. Поскольку в настоящее время

по этому вопросу имеется небольшое количество данных, противоречивых по своему характеру, были поставлены экспериментальные исследования. Целью этих исследований было: определить критическую скорость, при которой начинается сдувание частиц; установить характер зависимости между интенсивностью сдувания, скоростью и запыленностью воздушного потока; исследовать влияние угла встречи запыленной поверхности с воздушным потоком на величину критической скорости и интенсивность сдувания.

Опыты проводили в лабораторных условиях на экспериментальной установке, описанной в п. 3.4. Порядок экспериментальных работ был принят следующий.

Предварительно высушенная магнетитовая пыль с размером частиц от 0 до 10 мкм седиментационным методом наносилась на поверхность пластины. Величина поверхности слоя пыли во всех опытах была одинаковой и составляла $15 \cdot 10^{-4}$ м². Затем пластину помещали в рабочую часть трубы и включали вентилятор. По окончании опыта вентилятор выключали, пластину извлекали из трубы и взвешивали на аналитических весах АДВ-200. Разность в массе пластины до и после опыта показывали величину уноса пыли. Интенсивность сдувания Φ_0 (мг/(с·м²)) и запыленной поверхности рассчитывали по формуле

$$\Phi_0 = (G_1 - G_2)/(St), \quad (3.20)$$

где G_1 и G_2 — масса пластины с пылью соответственно до опыта и после опыта, мг; S — площадь запыленной поверхности, м²; t — продолжительность опыта, с.

Скорость воздушного потока при опытах изменялась от 1,5 до 8 м/с с интервалом изменения от 0,4 до 0,6 м/с. При одной и той же скорости опыт повторялся не менее 3 раз. Во время опытов регистрировали колебания атмосферного давления, влажности и температуры, которые учитывались при определении скорости воздушного потока.

Для выяснения влияния свойств запыленной поверхности на процесс сдувания пыли, было выполнено две серии опытов с двумя различными поверхностями. В первой серии сдувание пылевых частиц происходило с гладкой поверхности металлической пластины. Во второй пластины имели шероховатую магнетитовую поверхность, которая создавалась описанным в п. 3.4 способом.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.5. Из графика видно, что сдувание пыли с обеих поверхностей начинается при одной и той же скорости воздушного потока, равной 4 м/с. При скоростях до 5,5 м/с интенсивность сдувания пыли также одинаковая. При дальнейшем увеличении скорости интенсивность сдувания пыли с металлической поверхности значительно больше, чем с магнетитовой поверхности. Это объясняется тем, что при небольших скоростях воздушного потока (в условиях опыта до 5,5 м/с) происходит срыв отдельных частиц с поверхности слоя самой пыли. Аэродинамическим силам потока, под воздействием которых происходит срыв пыли, противодействуют силы сцепления между от-

дельными частицами. При больших скоростях воздушного потока (в условиях опыта более 5,5 м/с) происходит массовый унос пыли непосредственно с самой поверхности, на которой она лежит. В этом случае сдуванию пыли противодействуют в основном силы сцепления между пылевыми частицами и поверхностью. Поскольку эти силы для гладкой металлической поверхности меньше, чем для шероховатой магнетитовой, то интенсивность сдувания пыли с металлической поверхности больше, чем с магнетитовой.

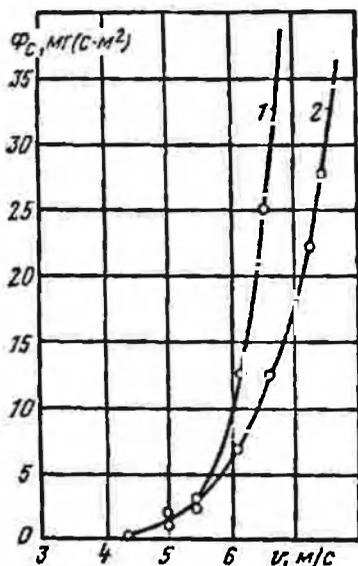


Рис. 3.5. График зависимости интенсивности сдувания пыли Φ_c от скорости вентиляционной струи v : 1 и 2 — соответственно для гладкой и шероховатой поверхностей

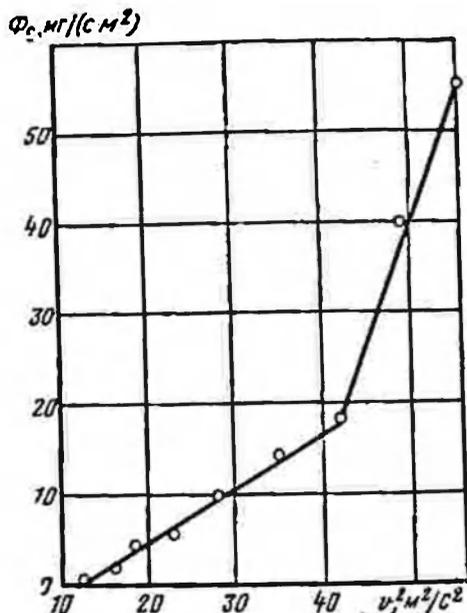


Рис. 3.6. График зависимости интенсивности сдувания пыли Φ_c с магнетитовой поверхности от квадрата скорости вентиляционной струи v^2 при угле встречи потока с запыленной поверхностью $\beta=20^\circ$

В целях создания условий, подобных натурным при проведении всех последующих экспериментов применялись пластины с магнетитовой поверхностью.

Чтобы выявить влияние на критическую скорость срыва и интенсивность сдувания пыли структуры воздушного потока, эксперименты проводились вначале в некрепленной модели при $\alpha=3 \cdot 10^{-3}$ Н·с²/м⁴, затем повторялись в этой же модели, закрепленной полными крепежными рамами. Коэффициент аэродинамического сопротивления модели после установки крепи был примерно равен натурному и составлял $14 \cdot 10^{-3}$ Н·с²/м⁴. В модели с крепью отдельно определялась интенсивность сдувания пыли с крепления и из межкладного пространства.

При определении влияния угла встречи воздушного потока с запыленной поверхностью на критическую скорость срыва и интенсивность сдувания пыли в модели без крепи опыты проводились

при 5 значениях этого угла (0, 20, 40, 60 и 80°), в модели с крепью — при четырех значениях (0, 20, 40 и 60°). Поскольку сдувание пыли происходит под динамическим воздействием потока, в основу обработки результатов экспериментов было положено допущение о том, что интенсивность сдувания прямо пропорциональна скоростному напору вентиляционной струи.

Визуальные наблюдения и результаты экспериментов показали, что можно выделить две критические скорости $v_{1кр}$ и $v_{2кр}$, характеризующие процесс сдувания пыли с запыленной поверхности. При $v_{1кр}$ начинается отрыв отдельных частиц с поверхности слоя пыли, при $v_{2кр}$ — массовый унос пыли.

На рис. 3.6 приведены результаты экспериментов по определению интенсивности сдувания пыли с запыленной поверхности, расположенной под углом 20° к направлению воздушного потока. Зависимость интенсивности сдувания пыли от квадрата средней скорости вентиляционной струи выражается ломаной линией, имеющей перелом в области второй критической скорости. Подобные зависимости получены и при других углах встречи воздушного потока с запыленной поверхностью.

Значения первой и второй критических скоростей в зависимости от угла встречи потока с запыленной поверхностью следующие:

для модели без крепки					
β	0°	20°	40°	60°	80°
$v_{1кр}$, м/с	4,0	3,2	3,2	2,4	2,4
$v_{2кр}$, м/с	6,0	6,5	4,3	6,3	5,9

для модели с крепью					
β	0°	20°	40°	60°	
$v_{1кр}$, м/с	3,0	2,6	2,3	1,8	
$v_{2кр}$, м/с	7,3	6,0	4,3	6,3	

Из приведенных данных видно, что значения первой критической скорости уменьшаются с увеличением угла встречи воздушного потока с запыленной поверхностью. Взаимосвязь между этими величинами можно описать уравнением вида

$$v_{1кр} = v_{1кр_0} - b \sin \beta, \quad (3.21)$$

где $v_{1кр}$ — первая критическая скорость срыва при угле встречи потока с поверхностью β , м/с; $v_{1кр_0}$ — то же при $\beta=0^\circ$, м/с; b — опытный коэффициент, имеющий размерность скорости; β — угол встречи запыленной поверхности с воздушным потоком, град.

Для условий модели без крепки $b=1,7$; с крепью $b=1,1$.

Значение второй критической скорости $v_{2кр}$ во время опытов изменялось от 4,3 до 6,5 м/с для модели без крепки и от 4,3 до 7,3 м/с — с крепью. При этом какой-либо закономерности в изменении значения $v_{2кр}$ не прослеживается. Эти колебания могут быть объяснены различной толщиной слоя пыли на пластинах, так как нанести слой одинаковой высоты во всех опытах не представлялось возможным. При более тонком слое массовый унос начинается

раньше. Приняв в первом приближении площади запыленных поверхностей различной ориентировки равными между собой, были определены средние значения интенсивности сдувания с единицы площади поверхности выработок при различных скоростях воздушного потока. Среднюю величину уноса при каждой скорости воздушного потока находили как среднее арифметическое из значений интенсивности сдувания пылин при различных углах встречи воздушного потока с запыленной поверхностью.

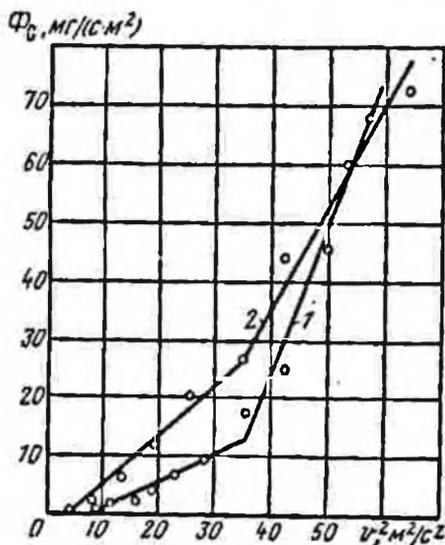


Рис. 3.7. График зависимости средней величины интенсивности сдувания пыли Φ_0 от квадрата скорости воздушного потока v^2 :
1 и 2 — соответственно для модели выработки без крепи и с крепью

Поскольку частные значения величины уноса пропорциональны квадрату скорости, то и ее средние значения подчиняются той же закономерности. Некоторый разброс точек (рис. 3.7) относительно осредняющих прямых за точкой перелома объясняется различными значениями $v_{2кр}$ для разных углов встречи поверхности с потоком. В целом же полученная ранее закономерность наблюдается и для средних значений интенсивности сдувания. В общем виде взаимосвязь между интенсивностью сдувания и скоростью воздушного потока может быть выражена уравнением вида

$$\Phi_c = a_1 v^2 - [v_{2кр}^2 (\bar{a}_1 - a) + a v_{1кр}^2] \quad (3.22)$$

где Φ_0 — интенсивность сдувания пыли, мг/(с·м²); v — скорость воздушного потока, м/с; a и a_1 — соответственно опытные коэффициенты, зависящие от свойств пыли и поверхности, мг·с/м⁴.

При скоростях воздушного потока меньше $v_{2кр}$ в уравнение (3.22) вместо $v_{2кр}$ следует подставить значение средней скорости потока v . В этом случае уравнение (3.22) примет вид

$$\Phi_0 = a (v^2 - v_{1кр}^2) \quad (3.23)$$

Численные значения a , a_1 , $v_{1кр}$ и $v_{2кр}$ для условий эксперимента приведены ниже.

	a , мг·с/м ⁴	a_1 , мг·с/м ⁴	$v_{1кр}$, м/с	$v_{2кр}$, м/с
Модель без крепи	0,5	2,5	2,4	6
Модель с крепью	0,87	1,75	1,8	6

Если при проветривании чистым воздухом отрыв частиц с запыленной поверхности происходит только за счет аэродинамических сил потока, то при наличии взвешенных частиц отрыв отдельных пылин, по мнению исследователей [4], может происхо-

дуть под действием сил инерции частиц, достигших запыленной поверхности. При этом на величину уноса пыли оказывают влияние концентрация взвешенных частиц и их размер.

Эксперименты по определению влияния запыленности и размеров взвешенных частиц на величину критической скорости и интенсивность сдувания пыли проводились в следующей последовательности. Как и при незапыленном потоке, пластины с навеской магнетитовой пыли с размером частиц от 0 до 10 мкм помещались в рабочую часть аэродинамической трубы. Затем включались вентилятор и пылепитатель, после чего пластина вынималась и взвешивалась. В этих опытах наряду со сдуванием имело место также и осаждение частиц. Чтобы учесть этот фактор, кроме пластин с навесками пыли рядом помещали чистые пластины. Разность в их массе до опыта и после показывала величину осаждения.

Величину уноса пыли Φ'_c [мг/(с·м²)] под воздействием запыленного потока определяли по формуле

$$\Phi'_c = [(G_1 - G_2) + (G_4 - G_3)] / (St), \quad (3.24)$$

где G_1 и G_2 — масса пластины с навеской пыли соответственно до и после опыта, мг; G_3 и G_4 — масса пластины без навески пыли соответственно до и после опыта, мг; S — площадь поверхности сдуваемой пыли, м²; t — продолжительность опыта, с.

Было выполнено четыре серии опытов с запылением воздушной струи пылью классов 0—10, 10—15, 15—20 и +20 мкм. При каждом классе запыленность вентиляционной струи изменяли в основном от 10 до 100 мг/м³. Все эксперименты проводили в модели без крепи при скоростях воздушного потока от 5,5 до 6,0 м/с, а для пыли класса 0—10 мкм, кроме того, еще и при скоростях 4,5—5,0 м/с.

В модели с крепью опыты проводили только при запылении воздушного потока пылью класса 0—10 мкм. Эксперименты выполняли при скоростях воздушного потока 4,5; 5,4; 6,0 и 6,6 м/с. Отдельно определяли величину уноса из межкладного пространства и с крепления.

Процесс срыва пыли воздушным потоком, запыленным пылью класса 0—10 мкм, изучался более подробно, так как в атмосфере подземных выработок взвешена, главным образом пыль с частицами такого размера.

Результаты экспериментов по определению влияния запыленности воздушного потока на интенсивность сдувания пыли с запыленной поверхности при скорости движения воздуха 4,5 м/с приведены на рис. 3.8. На графике по оси абсцисс отложены концентрации пыли в потоке, а по оси ординат — значения $\Delta\Phi_c = \Phi'_c - \Phi_c$ (Φ'_c — интенсивность сдувания частиц запыленным потоком (Φ_c — интенсивность сдувания пыли чистым потоком при тех же условиях). Величина $\Delta\Phi_c$ показывает интенсивность сдувания пыли за счет кинетической энергии взвешенных частиц. Подобные зависимости получены и при других значениях скорости вентиляционной струи и размерах частиц в воздушном потоке.

Взаимосвязь между интенсивностью сдувания и запыленностью потока во всех случаях описывается уравнением

$$\Phi'_c - \Phi_c = c' n \quad (3.25)$$

где c' — размерный коэффициент, зависящий от скорости воздушного потока, размера взвешенных в потоке частиц и их физических свойств, м/с.

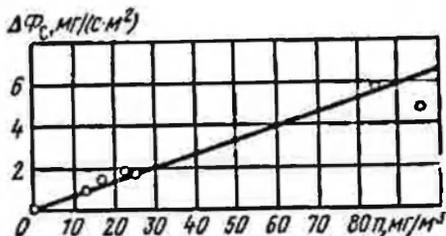


Рис. 3.8. График зависимости приращения интенсивности сдувания пыли $\Delta\Phi_c$ с поверхности модели выработки с крепью от запыленности воздушного потока l

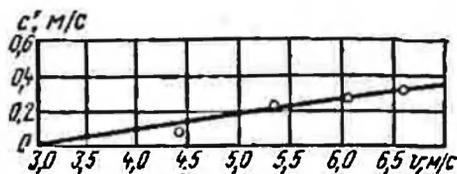


Рис. 3.9. График зависимости коэффициента c' от скорости воздушного потока v для модели выработки с крепью

Во время опытов влияния запыленности воздушного потока на величину критической скорости срыва пыли установлено не было (в модели без крепи при $\beta=0^\circ$ и скорости воздушного потока 4 м/с сдувания пыли не наблюдалось). Опыты, проведенные при запылении воздушного потока пылью с размерами частиц 0—10, 10—15, 15—20 и +20 мкм, показали, что величина уноса пыли с запыленной поверхности зависит от дисперсного состава пыли, находящейся во взвешенном состоянии. При одной и той же концентрации пыли интенсивность сдувания тем больше, чем меньше размеры частиц.

Эксперименты, выполненные в закрепленной модели, показали, что интенсивность сдувания с крепи возрастает пропорционально запыленности воздушного потока. В межкладном пространстве во всех опытах интенсивность сдувания не превышала таковой же для условий незапыленного потока.

Результаты экспериментов по определению коэффициента c' приведены на рис. 3.9. Зависимость коэффициента c' от скорости вентиляционной струи v может быть выражена уравнением

$$c' = c_1 (v - v_{1кр}). \quad (3.26)$$

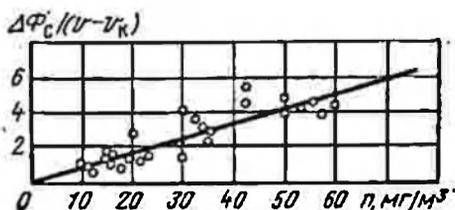
Уравнение справедливо при условии, что $v < v_{2кр}$. При скоростях воздушного потока больше $v_{2кр}$ начинается массовый унос частиц с поверхности за счет аэродинамических сил и доля срыва пыли под действием инерции витающих частиц становится незначительной. Поскольку в горных выработках скорость воздушного потока обычно не превышает 6 м/с, то в указанных пределах может быть использована зависимость (3.26).

Заменяв в уравнении (3.25) c' его значением, получим

$$\Phi_c' - \Phi_c = c_1'(v - v_{1кр})n. \quad (3.27)$$

Опытные точки, полученные при разных значениях скорости воздушного потока (рис. 3.10), удовлетворительно расположились около прямых, тангенс угла наклона которых численно равен значениям коэффициента c_1' . Для модели без крепи он равен 0,5, с крепью — 0,083.

Рис. 3.10. График зависимости относительной величины уноса пыли $\Delta\Phi_c/(v-v_{кр})$ в модели выработки без крепи от запыленности воздушного потока n



Поскольку уравнение (3.27) справедливо при скоростях воздушного потока менее $v_{2кр}$, то, заменив Φ_c его значением из (3.23), найдем, что

$$\Phi_c' = a(v^2 - v_{1кр}^2) + c_1'(v - v_{1кр})n. \quad (3.28)$$

Следует подчеркнуть, что данная зависимость получена в условиях, наиболее благоприятных для сдувания пыли, так как опыты проводили с предварительно высушенной пылью. Частицы пыли осаждались на пластины седиментационным способом, поэтому слой пыли не был уплотнен. Необходимо также отметить, что во время опытов с запыленным потоком при всех скоростях воздушной струи наблюдался процесс осаждения частиц на кровлю, стенки и почву модели. В некоторых случаях величина привеса пыли на чистых пластинах была равна, а иногда даже и больше величины, унесенной с запыленных пластин пыли. В этом случае наблюдалось главным образом инерционное осаждение частиц. Слой пыли был более плотным, чем при седиментационном осаждении. Уноса пыли с этих пластин не наблюдалось даже при скорости воздушного потока свыше 7 м/с. Не было заметно также сдувания частиц пыли, осевшей на стенках, почве и кровле рабочей части трубы. Все это дает основание полагать, что физико-химические связи между частицами, осажденными в результате инерционных сил, более сильные, чем между частицами, осажденными седиментационным способом.

Учитывая, что в шахтах пыль осаждается из потока, главным образом, за счет инерционных сил и то, что влажность стенок и самой пыли более высокая, чем в условиях модели, можно ожидать, что значения первой и второй критических скоростей будут значительно больше, чем в модели.

С целью проверки справедливости уравнения (3.28) для условий шахты были выполнены производственные исследования на

Высокогорском руднике. Эксперименты проводились в относительно сухой вентиляционной выработке с сильно запыленными стенками. Методика и порядок исследований были приняты следующие.

С помощью вентиляционных дверей и перемычек, имеющихся на горизонте, в выработке изменяли скорость вентиляционного потока от 0,8 до 5,5 м/с. Одновременно с изменением скорости отбирали пробы на запыленность воздуха в начале и в конце выработки на расстоянии 60 м друг от друга. Опыты проводились при пяти значениях скорости воздушного потока: 0,8; 2,2; 3,5; 4,7; 5,5 м/с. Продолжительность отбора пылевых проб составляла 20 мин. Предполагалось, что при наличии сдувания, вызванного увеличением скорости, запыленность воздуха в конце выработки должна существенно возрасти. Однако во всех опытах навески пыли в пробах, как в первом, так и во втором сечениях была очень мала.

Следовательно, в условиях шахты значение первой критической скорости выше 5,5 м/с. Дальнейшего увеличения скорости воздушного потока в выработке по техническим причинам осуществить не удалось.

Данные пылевых съемок, выполненных в условиях Криворожского бассейна, также показывают, что значения критических скоростей срыва пыли не ниже 4,5—5 м/с [15].

4. ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕЕ ПРОВЕТРИВАНИЕ СКВОЗНЫХ ВЫРАБОТОК

4.1. Основные требования, предъявляемые к противопопылевому вентиляционному режиму

Противопылевые вентиляционные режимы, создаваемые на рудниках, должны обеспечивать в комплексе с другими техническими мероприятиями устойчивое поддержание запыленности воздуха во всех действующих выработках в пределах санитарных норм. Для этой цели в шахты должно подаваться достаточное количество чистого, незапыленного воздуха. Содержание пыли в нем не должно превышать 30 % от предельно допустимой концентрации (ПДК) [8]. При более высоком содержании пыли должна предусматриваться предварительная очистка подаваемого воздуха. Для вновь проектируемых рудников правилами безопасности запрещается подача воздуха по стволам, оборудованным скиповыми подъемными, опрокидными клетями и конвейерами. Запрещается также подача воздуха в очистные выработки по рудоспускам и рудовыпускным воронкам. В очистные выработки воздух должен подаваться по вентиляционным восстающим или по выработкам, имеющим изолированные ходовые отделения.

Очистные блоки и камеры должны иметь обособленное проветривание. В отдельных случаях допускается последовательное проветривание не более двух очистных камер (блоков) при условии снижения содержания пыли в воздухе, поступающем во вторую камеру (блок), до концентрации, не превышающей 30 % от ПДК. Это может быть достигнуто за счет искусственной или естественной очистки воздуха от пыли, а также подачи добавочного количества свежего воздуха.

При наличии нескольких источников пылевыделения в выемочном участке (блоке), расположенных на общей вентиляционной струе, должны быть приняты меры, обеспечивающие поступление воздуха к каждому последующему рабочему месту с содержанием пыли не более 30 % от ПДК. При наличии полевых выработок должен предусматриваться отвод запыленного воздуха от каждого источника пылевыделения непосредственно в исходящую струю.

Горнодобывающее оборудование, работа которого сопровождается пылеобразованием, должно быть оснащено эффективными пылеподавляющими или пылеулавливающими устройствами. При ведении взрывных работ должны предусматриваться водяные завесы, внешние и внутренние гидрозабойки, орошение поверхности выработок и другие меры, обеспечивающие снижение выделения пыли в рудничную атмосферу. На каждой шахте должен быть сооружен водопровод, обеспечивающий подачу воды для целей борьбы с пылью.

Количество воздуха, подаваемого в выработки, должно быть достаточным для разбавления до допустимых концентраций выделяющейся в рудничную атмосферу пыли и создания скоростей вентиляционной струи, обеспечивающих эффективный вынос пылевых частиц из проветриваемых объемов. В то же время скорости вентиляционной струи не должны быть высокими, чтобы не происходило дополнительного запыления воздуха за счет сдувания осевшей пыли.

При ведении взрывных работ количество подаваемого в выработки воздуха должно быть достаточным для проветривания их за установленное правилами безопасности время.

Правильное определение расходов воздуха для проветривания является одной из основных задач при организации противопылевых вентиляционных режимов на рудниках.

4.2. Допустимые по пылевому фактору скорости движения воздуха

Режимы проветривания горных выработок, как отмечалось выше, должны быть такими, чтобы обеспечивался вынос пылевых частиц, находящихся во взвешенном состоянии, и не происходило сдувания пыли с отбитого полезного ископаемого и запыленных стенок выработок.

Минимальная скорость движения воздуха, обеспечивающая вынос пылевых частиц, определяется их размерами и плотностью, а

также свойствами потока несущей среды. Для того чтобы твердая частица находилась во взвешенном состоянии в турбулентном потоке, среднее квадратичное значение пульсационной скорости в направлении действия силы тяжести должно быть больше скорости падения частицы в спокойном воздухе.

На основе обобщения экспериментальных данных и современных представлений о структуре турбулентных потоков установлено [4], что для нахождения пылевых частиц во взвешенном состоянии необходимо, чтобы скорость движения воздуха в выработке отвечала условию

$$v \geq 3,13v_n/\sqrt{\alpha} \quad (4.1)$$

где v — скорость движения воздуха в горизонтальной выработке, см/с; v_n — скорость падения частиц данной крупности в спокойном воздухе, см/с; α — коэффициент аэродинамического сопротивления выработки, Н·с²/м⁴.

Скорость падения частицы в спокойном воздухе при условии, что ее диаметр d не превышает величины $60/\sqrt{\rho}$ (где ρ — плотность частицы, г/см³), определяется по формуле Стокса

$$v_n = 0,003\rho d^2 \quad (4.2)$$

где d — диаметр частицы, мкм.

Минимальная эффективная скорость движения воздуха, обеспечивающая установившиеся пульсации в плоскости поперечного сечения, определяется из выражения [4]

$$v_{\min} \geq 15,65/(d_{\text{ок}} \sqrt{\alpha}), \quad (4.3)$$

где $d_{\text{ок}}$ — средний диаметр оклада или средняя высота выступа шероховатости, см.

Расчеты, выполненные по формуле (4.3), показали, что значение минимальной эффективной скорости, обеспечивающей устойчивые пульсации в направлении действия силы тяжести в выработке со средней высотой выступа шероховатости 6—10 см и $\alpha = 0,014$ Н·с²/м⁴ находится в пределах 0,13—0,23 м/с.

Используя соотношения (4.1) и (4.3), можно подсчитать, что во взвешенном состоянии при этих скоростях движения воздуха будет находиться пыль с размерами частиц до 8—10 мкм (расчеты произведены для пыли плотностью 2,5—4 г/см³). При применении средств гидрообеспыливания в атмосферу выработок поступает пыль с размерами частиц до 5 мкм.

Минимально допустимая по правилам безопасности скорость вентиляционной струи 0,25 м/с вполне достаточна для эффективного выноса пыли.

Верхним пределом допустимых по пылевому фактору скоростей вентиляционной струи в выработках следует считать скорость движения воздуха, при которой начинается массовый унос пыли с запыленной поверхности, т. е. вторую критическую скорость $v_{2кр}$. Значение этой скорости для сухой магнетитовой пыли по результа-

там выполненных лабораторных исследований составляет 4,3—7,3 м/с (см. п. 3.5).

При непрерывных пылевыделениях, характеризующихся переменной интенсивностью, следует иметь в виду и скорость вентиляционной струи v' (м/с), при которой достигается минимальная запыленность воздуха в выработке

$$v' = 1/\sqrt{\varphi}, \quad (4.4)$$

где φ — коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыделения за счет динамического воздействия вентиляционной струи c^2/m^2 .

Из выражения (4.4) видно, что скорость вентиляционной струи, обеспечивающая минимальную запыленность, зависит только от величины коэффициента φ и не зависит от абсолютной величины пылевыделения и размеров выработки.

При скреперной доставке, погрузке и разгрузке руды влияние на величину этой скорости оказывает влажность руды. С увеличением влажности горной массы увеличивается скорость вентиляционной струи, соответствующая минимальной запыленности.

Зависимость скорости вентиляционной струи v'_{p} (м/с), обеспечивающей минимальную запыленность воздуха от влажности руды P описывается уравнением

$$v'_{p} = v'_{p_e} \sqrt{\exp[b(P - P_e)]}, \quad (4.5)$$

где v'_{p_e} — скорость вентиляционной струи, соответствующая минимальной запыленности при погрузке или скреперовании неувлажненной руды, м/с; P_e — естественная влажность руды, %; P — влажность отбитой руды после орошения, %; b — постоянная, зависящая от склонности руды к увлажнению.

4.3. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при взрывных работах

В сквозных выработках шахт взрывные работы в течение смены ведутся главным образом при дроблении негабаритных кусков руды и ликвидации завесаний в рудовыпускных воронках на горизонтах скреперования.

При системах разработки с массовой отбойкой руды горизонты скреперования представляют собой серию сквозных выработок, образующих сложное диагональное соединение. Эти выработки соединены с камерами рудовыпускными воронками, образующими своеобразные ниши. Во время выпуска руды сечение выработок скреперования часто уменьшается. Проветривание их осуществляется турбулентными потоками характеризующимися интенсивным перемешиванием воздуха. Часть выработки (ниши рудовыпускных воронок, расширения за высыпающейся рудой) проветривается ограниченными свободными струями. Поэтому снижение концентрации вредных примесей в выработке должно подчиняться законо-

мерностям, справедливым для свободных струй, и процесс проветривания выработки после взрыва заряда ВВ может быть описан уравнением

$$n = n_0 \exp(-Qk_n t/V) + n' \quad (4.6)$$

где n — концентрация пыли в выработке в момент времени t , мг/м³; n_0 — средняя концентрация пыли непосредственно после взрыва, мг/м³; Q — количество воздуха, проходящего по выработке, м³/с; V — объем, загрязненный продуктами взрыва, м³; k_n — коэффициент полезного действия вентиляционной струи; n' — содержание пыли в воздухе, подаваемом для проветривания, мг/м³.

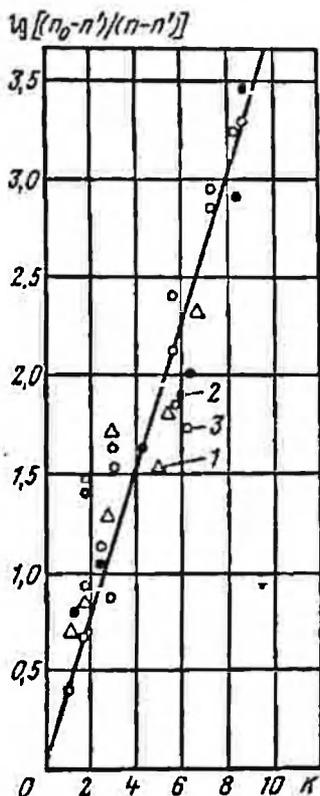


Рис. 4.1. График зависимости запыленности воздуха в аккумулярующей выработке после взрывания наружного заряда ВВ от кратности обмена в ней воздуха K :

1, 2 и 3 — соответственно при расходе воздуха 1,4; 1,25 и 2,1 м³/с

Для проверки справедливости уравнения (4.6) при проветривании горизонтов скреперования на шахте «Магнетитовая» Высокогорского рудника были проведены специальные эксперименты, сущность которых заключалась в наблюдении за изменением запыленности воздуха в аккумулярующей выработке после взрывания наружных зарядов ВВ различной величины при разных расходах воздуха. Полагая, что снижение концентрации пыли в экспериментальной выработке происходит по закону, описываемому уравнением (4.6), результаты наблюдений были обработаны в координатах $K = Qt/V$ и $\lg[(n_0+n')/(n-n')]$ (рис. 4.1). Экспериментальные точки, полученные при разных зарядах ВВ и расходах воздуха, удовлетворительно расположились около прямой, построенной с учетом уравнения (4.6). Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, умноженный на 2,3, численно равен коэффициенту полезного действия вентиляционной струи k_n , который получился равным 0,9.

Решив уравнение (4.6) относительно Q при $n = n_d$ (n_d — предельно допустимая концентрация пыли), получим формулу для определения количества воздуха, необходимого для проветривания выработки скреперования после взрыва заряда ВВ,

$$Q = \frac{V}{k_n t} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'} \quad (4.7)$$

где t — время проветривания, с.

Расчет количества воздуха, необходимого для обеспыливающего проветривания выработок скреперования после взрывания наружных зарядов ВВ, должен производиться в следующей последовательности.

1. По уравнению (1.6) находится общее количество пыли N (г), образующейся при взрыве наружного заряда ВВ.

2. Определяется длина зоны отброса газов и пыли $l_{з.о}$; при длине сквозных выработок до 60 м ее следует принимать равной длине выработки. При большей длине выработки расчет ведется по формуле (1.9).

3. Определяется начальная запыленность воздуха n_0 (мг/м³) в зоне отброса газа и пыли

$$n_0 = 10^3 N / (S l_{з.о}), \quad (4.8)$$

где S — площадь поперечного сечения выработки, м².

4. По уравнению (4.7) подсчитывается количество воздуха, необходимого для проветривания одной выработки после взрыва наружного заряда ВВ. Время проветривания выработки при этом принимается равным 300 с, коэффициент полезного действия вентиляционной струи $k_{п} = 0,9$.

Пример. Дано: длина выработки $L_n = 80$ м, площадь поперечного сечения $S = 5$ м², величина наружного заряда $A = 5$ кг, коэффициент крепости руды по шкале проф. М. М. Протоdjeяконова $f = 12$. Определить расход воздуха для проветривания.

Решение: $N = 8,2 \sqrt{5^2 \cdot 12} = 55$ г.

Значение C_1 взято для детонита 10 А.

$$l_{з.о} = 6,2 \cdot 5 + 40 = 71 \text{ м.}$$

Значения K и B приняты по табл. 1.1 для выработки с $\alpha = 0,017 + \div 0,020$ в с²/м⁴.

$$n_0 = 10^3 \cdot (55/71) \cdot 5 = 155 \text{ мг/м}^3;$$

$$Q = 71 \cdot 5 / (0,9 \times 300) \ln [(155 - 0)/(4 - 0)] = 4,8 \text{ м}^3/\text{с.}$$

4.4. Определение расхода воздуха для проветривания при буровых работах

Выше было показано, что интенсивность поступления пыли в рудничную атмосферу при бурении, погрузке, разгрузке и скреперовании руды и других производственных процессах, относящихся к источникам непрерывного пылевыведения, в диапазоне скоростей вентиляционной струи, допускаемых правилами безопасности, является переменной величиной, зависящей от режима проветривания выработки. Чем выше скорость вентиляционной струи, тем больше дисперсных частиц переходит во взвешенное состояние. При увеличении количества подаваемого для проветривания воздуха интенсивность пылевыведения растет. Это обстоятельство должно учитываться при определении расходов воздуха на проветривание по пылевому фактору.

Пусть в выработке с площадью поперечного сечения S находится источник непрерывного выделения вредных примесей с интенсивностью F (мг/с). Для проветривания выработки подается Q (м³/с) воздуха с начальным содержанием вредных примесей n' (мг/м³). Составив уравнение баланса вредных примесей, поступающих в выработку и выносимых из нее, и решив его, получим

$$n = n' + F/Q, \quad (4.9)$$

где n — средняя концентрация вредных примесей в выработке за источником их выделения, мг/м³. Подставим в уравнение (4.9) значение F из (2.28)

$$n = n' + F_0(1 + \varphi v^2)/Q, \quad (4.10)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, мг/с; φ — коэффициент, характеризующий приращение ин-

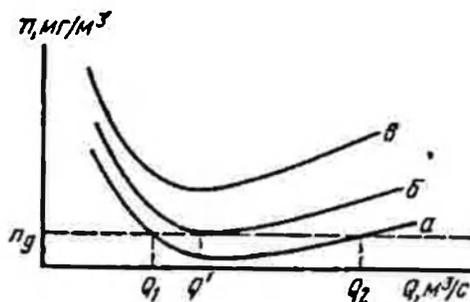


Рис. 4.2. График изменения запыленности воздуха n при различных режимах проветривания

тенсивности пылевыведения за счет динамического воздействия вентиляционной струи, с²/м²; v — скорость вентиляционной струи, м/с.

Выразив скорость вентиляционной струи через расход воздуха и площадь поперечного сечения выработки, получим уравнение, описывающее процесс проветривания сквозной выработки при наличии в ней непрерывного источника пылевыведения с переменной интенсивностью,

$$n = n' + F_0/Q + \varphi F_0 Q/S^2. \quad (4.11)$$

В соответствии с уравнением (4.11) запыленность воздуха в выработке при увеличении количества воздуха вначале уменьшается, затем, достигнув при каком-то расходе воздуха минимального значения, должна увеличиваться (рис. 4.2). Такая закономерность отмечалась в работах [7, 9, 12, 15, 17], но объяснялась она сдуванием пыли с боков, почвы и кровли выработок, происходящим при увеличении скорости вентиляционной струи.

Приравняв первую производную функцию (4.11) по расходу воздуха нулю, найдем расход воздуха, соответствующий минимальной запыленности в выработке,

$$Q' = S/\sqrt{\varphi}. \quad (4.12)$$

Подставив выражение (4.12) в уравнение (4.10), найдем минимальную запыленность воздуха, которая может быть достигнута с помощью вентиляции,

$$n_{\min} = n' + 2F_0 \sqrt{\varphi/S}. \quad (4.13)$$

В зависимости от значений n' , F_0 , φ и S запыленность воздуха, определяемая по уравнению (4.13), может быть меньше, равна или больше предельно допустимой концентрации пыли n_d (соответственно кривые a , b и v на рис. 4.2).

Если $n_{\min} < n_d$, существует область значений расхода воздуха от Q_1 до Q_2 , при которых содержание пыли в выработке не будет превышать ПДК. Кривая a , характеризующая изменение запыленности в зависимости от расхода воздуха, в этом случае пересекается с прямой $n=n_d$ в двух точках. Значения Q_1 и Q_2 могут быть определены при решении уравнения (4.11) относительно Q при $n=n_d$

$$Q_{1,2} = S^2 \left[n_d - n' \pm \sqrt{(n_d - n')^2 - 4F_0^2 \varphi / S^2} \right] / (2F_0 \varphi). \quad (4.14)$$

При $n_{\min} = n_d$ санитарный уровень запыленности в выработке может быть достигнут только при расходе воздуха, определяемом соотношением (4.12). При любых других расходах воздуха, как меньших, так и больших этого значения, запыленность будет превышать допустимую. Кривая b лишь только касается прямой, соответствующей уровню ПДК.

Если значение n_{\min} , определенное по формуле (4.13), превышает n_d , это означает, что при данных значениях показателей пылевыведения F_0 и φ снизить запыленность в выработке до ПДК с помощью только одной вентиляции невозможно. Кривая v , характеризующая изменение запыленности в выработке в зависимости от расхода воздуха на проветривание, проходит выше уровня ПДК. Для снижения запыленности в выработке до допустимого уровня в этом случае необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по уменьшению интенсивности пылевыведения.

Исходя из выше приведенного анализа, расчет количества воздуха, необходимого для проветривания сквозной выработки при бурении шпуров и скважин, должен производиться в следующей последовательности.

1. По формуле (4.13) определяется минимальная запыленность воздуха, которая достигается с применением вентиляции.

2. Если полученное значение n_{\min} меньше ПДК, по уравнению (4.14) определяются расходы воздуха Q_1 и Q_2 , в пределах которых содержание пыли не будет превышать ПДК. К расчету может быть принято любое значение Q , достаточное для проветривания выработки по другим факторам и удовлетворяющее условиям:

$$Q_1 \leq Q \leq Q_2, \quad (4.15)$$

$$v_{\min} S \leq Q \leq v_{\max} S, \quad (4.16)$$

где v_{\min} и v_{\max} — соответственно минимальная и максимальная скорости вентиляционной струи, допускаемые правилами безопасности, м/с.

3. Если значение n_{\min} получилось больше n_d , необходимо предусмотреть дополнительные меры для снижения интенсивности пылевыведения.

Расход воздуха для проветривания в этом случае, так же как и при $n_{\min} = n_d$, определяется по формуле (4.12).

Пример. Определять количество воздуха, необходимого для проветривания сквозной выработки с площадью поперечного сечения $S=6$ м² при бурении восстающих шпуров с промывкой телескопным перфоратором. Начальное содержание пыли в воздухе, подаваемой для проветривания, $n' = 0,5$ мг/м³, $n_d = 2$ мг/м³.

Решение: по табл. 2.3 принимаем $F_0 = 4,9$ мг/с, $\varphi = 0,7$ с²/м².

$$n_{\min} = 0,5 + 2 \cdot 4,9 \sqrt{0,7} / 6 = 1,87 \text{ мг/м}^3 < n_d;$$

$$Q_{1,2} = 6^2 \left[2 - 0,5 \pm \sqrt{(2 - 0,5)^2 - \frac{4 \cdot 4,9^2 \cdot 0,7}{6^3}} \right] / (2 \cdot 4,9 \cdot 0,7);$$

$$Q_1 = 4,7 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_2 = 11 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для проветривания выработки принимаем расход воздуха $\bar{Q} = Q_1 = 4,7$ м³/с, обеспечивающий снижение запыленности до ПДК и отвечающий условиям (4.15) и (4.16). Принимать большее количество воздуха не имеет смысла. Минимум запыленности 1,87 мг/м³, отличающийся от ПДК всего на 6,5 %, обеспечивается при расходе воздуха 4,7 м³/с, что на 53 % больше Q_1 .

4.5. Расчет противопылевых вентиляционных режимов при погрузке и скреперовании руды

Процессы скреперования, погрузки и разгрузки руды сопровождаются интенсивным пылевыведением.

Наибольшее влияние на интенсивность пылевыведения при этих производственных операциях, как указывалось выше, оказывает влажность руды. В связи с этим на рудниках при погрузочно-разгрузочных работах и скреперной доставке руды для снижения интенсивности пылевыведения и запыленности воздуха широко используется орошение. Сухие способы борьбы с пылью не нашли применения из-за трудности изолирования мест пылеобразования.

Орошение производится водой, распыляемой оросителями по всей поверхности отбитой горной массы.

Для того чтобы орошение было эффективным, следует правильно определять расходы воды. Недостаточное увлажнение не позволяет добиться желаемого снижения интенсивности пылевыведения. Переувлажнение горной массы нежелательно как по технологическим причинам, так и из-за ухудшения метеорологических условий в выработках.

На рис. 4.3 и 4.4 приведены результаты производственных наблюдений по изучению влияния влажности отбитой горной массы на интенсивность пылевыведения и запыленность воздуха. Из приведенных рисунков видно, что увеличивать расход воды на орошение необходимо до определенного предела (в приведенных при-

мерах до 6—8 л/т). При дальнейшем увеличении расхода воды удельное пылевыведение и запыленность воздуха почти не снижаются.

В связи с изложенными при расчете противопылевых вентиляционных режимов в выработках, в которых производится погрузка

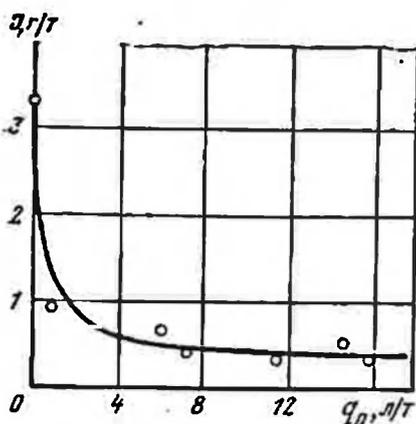


Рис. 4.3. График зависимости удельного пылевыведения J при работе погрузочной машины типа «Джой» от расхода воды q_0 на орошение

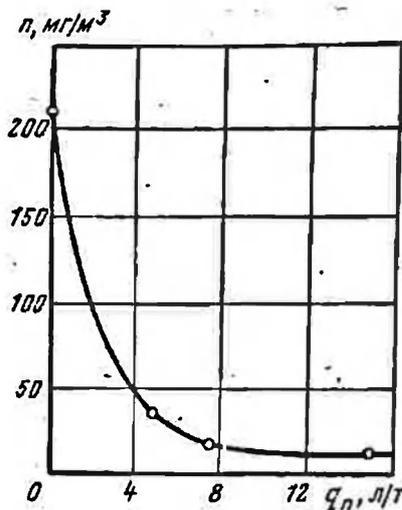


Рис. 4.4. График зависимости запыленности воздуха n при погрузке руды со скреперного полка от расхода воды q_0 на орошение

или скреперная доставка руды, должны определяться не только расходы воздуха для проветривания, но и расходы воды на орошение.

Значение влажности, до которой должна увлажняться руда, может быть определено следующим образом.

Подставив в уравнение (4.11) значения \bar{F}_n и φ из выражений (2.55) и (2.56), получим

$$n = \frac{F_{n_0}}{Q} e^{-a(P-P_0)} \left[1 + \varphi_0 e^{-b(P-P_0)} \frac{Q^2}{S^2} \right] + n'. \quad (4.17)$$

Чтобы определить необходимую степень увлажнения руды, необходимо решить уравнение (4.17) относительно P при $n=n_d$ (n_d — предельно допустимая концентрация пыли). Аналитическое решение уравнения (4.17) относительно P очень сложное. Проще решить его графически. Для этого нужно, задавшись рядом значений P , определить соответствующие значения n . Затем построить график зависимости n от P . Необходимая степень увлажнения руды P будет соответствовать абсциссе точки пересечения полученной кривой с прямой $n=n_d$ (рис. 4.5). Зная необходимый процент увлажнения руды, можно определить расход воды на 1 т отбитой горной массы.

При орошении увлажнение кусков отбитой руды происходит за счет влаги, адсорбирующейся на поверхности кусков. Следовательно, чем больше суммарная поверхность измельченного материала, или, чем больше степень измельчения, тем больше воды потребуется для смачивания породы или руды.

Количество воды q_v ($\text{м}^3/\text{т}$), необходимой для увлажнения 1 т руды,

$$q_v = 10z(P - P_e)/\rho_v, \quad (4.18)$$

где z — коэффициент, учитывающий степень измельчения руды; ρ_v — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Значение коэффициента z для железорудных шахт Урала составляет в среднем 0,16.

Зная удельный расход воды, можно определить производительность оросительной установки ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$q_0 = q_v T/t, \quad (4.19)$$

где T — сменная производительность скреперной доставки или погрузки руды, т/смену; t — чистое время работы скреперной или погрузочной установки, с.

По найденному значению q_0 подбираются оросители с нужной гидравлической характеристикой.

При расчете обеспыливающего проветривания выработок, в которых производится скреперование или погрузка руды, кроме определения расхода воздуха решают вопросы, связанные с орошением руды. В зависимости от наличия исходных данных и возможности использования средств гидрообеспыливания могут встретиться следующие варианты задач по определению расхода воздуха для проветривания выработки.

1. Заданы интенсивность пылевыделения F_0 при отсутствии проветривания и коэффициент φ_e , характеризующий приращение интенсивности пылевыделения при увеличении скорости движения воздуха для руды с естественной влажностью P_e . Орошение по каким-либо причинам недопустимо или невозможно осуществить.

2. Скреперование или погрузка производятся с использованием средств гидрообеспыливания. Режим орошения задан, известны значения F_0 и φ для увлажненной руды.

3. Режим орошения задан. Известны естественная влажность руды P_e , влажность руды после орошения P , интенсивность пылевыделения F_0 и коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыделения φ_e для неувлажненной руды. Известны также коэффициенты a и b , характеризующие изменение показателей пылевыделения при увеличении влажности руды.

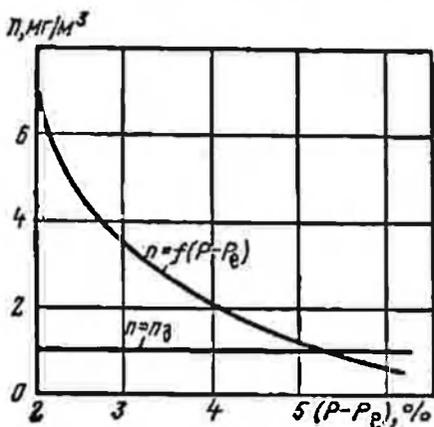


Рис. 4.5. График к решению уравнения (4.17)

4. Заданы показатели F_0 и φ_e , a и b . Режим орошения не задан. Определить расход воздуха для проветривания выработки и необходимую степень увлажнения руды.

В первых трех вариантах расчет количества воздуха, необходимого для проветривания выработки, производится по методике, описанной для буровых работ.

Вместо F_0 и φ в расчетные формулы (4.12), (4.13) и (4.14) в первом варианте подставляются F_0 и φ_e . В третьем варианте значения \bar{r}_n и φ определяются по формулам (2.55) и (2.56).

В последней задаче расчет обеспыливающего проветривания производят в следующей последовательности.

1. По формуле (4.13) определяют минимальную запыленность воздуха, которая может быть достигнута с помощью одной вентиляции.

2. Если $n_{\min} < n_d$, орошение скреперусемой горной массы можно не предусматривать.

Количество воздуха, необходимого для проветривания, в этом случае находят из уравнения (4.14) с учетом условий (4.15) и (4.16).

3. Если $n_{\min} > n_d$, по формуле (4.12) определяют расход воздуха Q , обеспечивающий максимальное снижение запыленности в выработке.

4. По уравнению (4.17) строится график зависимости запыленности от $(P - P_e)$ при расходе воздуха, равном Q .

5. Определяют, на сколько процентов должна быть увеличена влажность горной массы за счет орошения, чтобы запыленность воздуха не превышала ПДК. Минимальное значение $(P - P_e)$ определяется как абсцисса точки пересечения построенной кривой с прямой $n = n_d$.

6. Определяют количество воды, необходимой для увлажнения 1 т руды по формуле (4.18).

7. По формуле (4.19) находят производительность оросительной установки и подбирают оросители с нужной гидравлической характеристикой.

Значения F_0 и φ_e при скреперной доставке и люковой погрузке руды для некоторых рудников приведены в табл. 2.3. Коэффициенты, характеризующие склонность руды и пыли к увлажнению, для этих же рудников составляют: $a = 0,42 \div 0,48$; $b = 0,25 \div 0,26$.

Если в качестве исходных данных для расчета заданы значения удельного пылевыведения J_0 , интенсивность пылевыведения находится из соотношения (2.29).

Пример. Дано: $F_0 = 80$ мг/с; $\varphi_0 = 0,7$ с²/м²; $a = 0,5$; $b = 0,25$; $P_e = 0,6$ %; $S = 6$ м²; $n' = 0$; $n_d = 1$ мг/м³. Определить количество воздуха, необходимого для проветривания выработки, и удельный расход воды для орошения.

Решение: $n_{\min} = n' + 2F_0 \varphi_e / S = 0 + 2 \cdot 80 \cdot 0,7 / 6 = 22,3$ мг/м³ $> n_d$;

$$Q = S / \sqrt{\varphi_e} = 6 / \sqrt{0,7} = 7,15 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Задавшись рядом значений $(P - P_e)$, по уравнению (4.17) определяем соответствующие значения n .

$(P - P_e), \%$	2	4	6
$n, \text{ мг/м}^3$	6,6	2,7	0,7

По полученным данным строим график $n=f(P-P_e)$ и проводим прямую $n=n_1$ (см. рис. 4.5). Абсцисса точки пересечения кривой с прямой 5,3. Следовательно влажность руды за счет орошения должна быть повышена не менее, чем на 5,3 %.

Удельный расход воды

$$q_w = 10 \cdot 0,16 \cdot 5,3 / 1000 = 0,0085 \text{ м}^3/\text{т}.$$

При погрузке руды из люка или со скреперного полка, когда рабочее место люкового находится перед погрузочным пунктом со стороны поступления свежего воздуха, интенсивность пылевыделе-

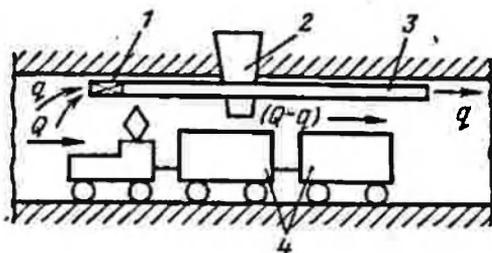


Рис. 4.6. Схема проветривания погрузочного пункта:

1 — вентилятор; 2 — бункер; 3 — трубопровод; 4 — вагонетки

ния может быть снижена также за счет уменьшения скорости вентиляционной струи в выработке у погрузочного пункта. Для этой цели перед погрузочным пунктом устанавливается вентилятор. Он забирает часть воздуха, поступающего по выработке, и направляет его за погрузочный пункт (рис. 4.6). Это позволяет снизить динамическое воздействие воздушного потока на падающий в вагонетки материал n за счет этого уменьшить количество дисперсных частиц, выдуваемых из него. Поскольку количество воздуха, проходящего по выработке, при этом не изменяется, концентрация пыли в ней за погрузочным пунктом уменьшается.

При рассматриваемом способе проветривания скорость движения воздуха у погрузочного пункта

$$v = (Q - q) / S, \quad (4.20)$$

где Q — расход воздуха, поступающего по выработке, $\text{м}^3/\text{с}$; q — производительность вентилятора местного проветривания $\text{м}^3/\text{с}$; S — площадь поперечного сечения выработки у погрузочного пункта, м^2 .

Интенсивность пылевыделения при погрузке с учетом выражений (2.28) и (4.20) будет

$$F = F_0 [1 + \varphi(Q - q)^2 / S^2] \quad (4.21)$$

Подставив значение F из выражения (4.21) в уравнение (4.11), найдем запыленность, которая установится в выработке за погрузочным пунктом,

$$n = \frac{F_0}{Q} \left[1 + \varphi \left(\frac{Q - q}{S} \right)^2 \right] + n', \quad (4.22)$$

где n' — содержание пыли в свежем воздухе, мг/м³.

Запыленность воздуха на участке от места погрузки до конца вентиляционного трубопровода будет выше и может быть определена из выражения

$$n_1 = F_0 [1 + \varphi (Q - q)^2 / S^2] / (Q - q) + n' \quad (4.23)$$

Из выражений (4.22) и (4.23) видно, что чем меньше разность $(Q - q)$, тем меньше интенсивность пылевыделения и запыленность воздуха за погрузочным пунктом. Так как скорость вентиляционной струи в действующих выработках по ПБ должна быть не менее 0,25 м/с, то минимальные значения интенсивности пылевыделения и запыленности за погрузочным пунктом, которые могут быть достигнуты при установке вентиляторов, равны:

$$F = F_0 (1 + 0,0625\varphi); \quad (4.24)$$

$$n = F_0 (1 + 0,0625\varphi) / Q + n'. \quad (4.25)$$

Решив уравнение (4.25) относительно Q при $n = n_d$, можно найти расход свежего воздуха в выработке, достаточный для снижения запыленности в исходящей струе за погрузочным пунктом до ПДК.

$$Q = F_0 (1 + 0,0625\varphi) / (n_d - n'). \quad (4.26)$$

Количество воздуха, направляемого при этом через трубопровод, должно быть равным

$$q = Q - 0,25S. \quad (4.27)$$

В тех случаях, когда устанавливаемый вентилятор имеет меньшую производительность, расход свежего воздуха на проветривание находится путем решения уравнения (4.22) относительно Q при $n = n_d$:

$$Q = q + \frac{S^2 (n_d - n')}{2F_0\varphi} \pm \frac{S}{\sqrt{\varphi}} \times \\ \times \sqrt{\frac{S^2 (n_d - n')^2}{4F_0^2\varphi} + \frac{(n_d - n')}{F_0} q - 1}. \quad (4.28)$$

Если при расчете по формуле (4.28) подкоренное выражение окажется отрицательным, то при данной производительности вентилятора q снизить запыленность до ПДК невозможно при любом расходе воздуха Q .

Минимальное значение производительности вентилятора, при которой возможно уменьшение запыленности в выработке за погрузочным пунктом до ПДК, определяется при условии равенства подкоренного выражения нулю

$$q = \frac{F_0}{\varphi} (n_d - n') - S^2 (n_d - n') / (4F_0\varphi). \quad (4.29)$$

Расчет обеспыливающего вентиляционного режима при рассматриваемом способе проветривания заключается в определении

расхода воздуха и производительности вентилятора, достаточных для снижения концентрации пыли за погрузочным пунктом до ПДК.

Порядок расчета следующий.

1. По формуле (4.13) находится значение минимальной запыленности n_{\min} .

2. Если $n_{\min} > n_d$, а орошение по каким-либо причинам применить невозможно или для проветривания по обычной схеме требуется большой расход воздуха, предусматривается снижение интенсивности пылевыведения за счет уменьшения скорости вентиляционной струи и по формулам (4.26) и (4.27) рассчитываются требуемые расход свежего воздуха Q и производительность вентилятора местного проветривания q .

Если производительность вентилятора меньше значения q , рассчитанного по формуле (4.27), но больше значения q , рассчитанного по формуле (4.29), расход свежего воздуха, необходимого для проветривания, определяется по уравнению (4.28).

Пример. Рассчитать проветривание выработки при люковой погрузке руды, если $F_0 = 82$ мг/с; $\varphi = 0,78$ с²/м²; $S = 10$ м²; $n = \bar{n}$; $n_d = 10$ мг/м³. Орошение не производится.

Решение: $n_{\min} = 0 + 2 \cdot 82 \sqrt{0,78} / 10 = 14,5$ мг/м³. Так как $n_{\min} > n_d$, предусматриваем аэродинамический способ снижения интенсивности пылевыведения и определяем требуемые расход свежего воздуха и производительность вентилятора местного проветривания:

$$Q = 8,2 (1 + 0,0625 \cdot 0,78) / 10 = 8,6 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q = 8,6 - 0,25 \cdot 10 = 6,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

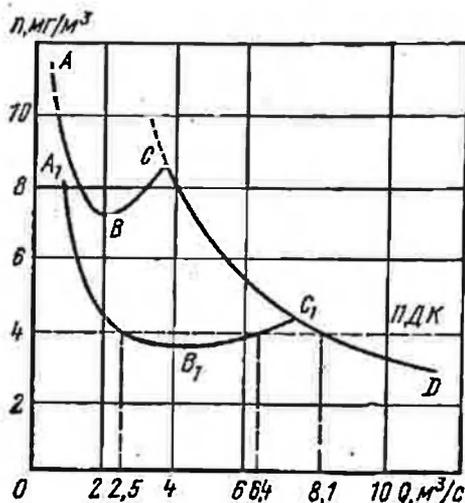
4.6. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при электросварочных работах

При дуговой электросварке в отличие от других производственных процессов, относящихся к источникам непрерывного пылевыведения, образуются более мелкие и однородные по крупности пылевые частицы. Выше было показано, что при скоростях вентиляционной струи более 0,7—0,75 м/с все дисперсные частицы, образующиеся в процессе сварки, переходят во взвешенное состояние, интенсивность пылевыведения достигает максимального значения и становится постоянной, не зависящей от динамического воздействия воздушного потока. При меньших скоростях вентиляционной струи интенсивность пылевыведения при электросварочных работах зависит от скорости движения воздуха. На производстве имеют место режимы проветривания, соответствующие как постоянной, так и переменной интенсивности пылевыведения (рис. 4.7). Участки кривых ABC и $A_1B_1C_1$ соответствуют режимам проветривания, при которых интенсивность пылевыведения зависит от скорости вентиляционной струи, участки CD и C_1D — режимам проветривания, при которых интенсивность пылевыведения постоянная.

В выработке с площадью поперечного сечения 5 м² снижение концентрации пыли до уровня санитарных норм возможно только

при расходе воздуха не менее $8,1 \text{ м}^3/\text{с}$. При режимах проветривания, соответствующих переменной интенсивности пылевыведения, добиться снижения запыленности воздуха до предельно допустимой концентрации невозможно. Кривая ABC , характеризующая изменение запыленности воздуха в зависимости от его расхода, проходит выше уровня ПДК.

Рис. 4.7. График зависимости запыленности n при сварке электродами ОЗС-4 от расхода воздуха на проветривание Q : $ABCD$ — в выработке с $S=5 \text{ м}^2$; $A_1B_1C_1D_1$ — в выработке с $S=10 \text{ м}^2$



В выработке с площадью поперечного сечения 10 м^2 снижение концентрации пыли до уровня ПДК возможно при режимах проветривания, соответствующих переменной и постоянной интенсивности пылевыведения. При расходах воздуха от $2,5$ до $6,4 \text{ м}^3/\text{с}$ и свыше $8,1 \text{ м}^3/\text{с}$ концентрация пыли не превышает уровень санитарных норм. Для проветривания выработки с $S=10 \text{ м}^2$ требуется воздуха в три раза меньше, чем для выработки с $S=5 \text{ м}^2$.

Количество воздуха, необходимого для проветривания сквозной выработки при режимах, соответствующих переменной интенсивности пылевыведения, определяется по формуле (4.14), при режимах проветривания, соответствующих постоянной интенсивности пылевыведения, — по формуле

$$Q = F_{\max} / (n_{\text{д}} - n'), \quad (4.30)$$

где F_{\max} — максимальная интенсивность пылевыведения для данного типа электродов, $\text{мг}/\text{с}$.

При ведении электросварочных работ значения интенсивности пылевыведения F_0 и F_{\max} зависят от квалификации сварщика и характера выполняемых сварочных работ. Более стабильным показателем является удельное пылевыведение, значение которого в меньшей степени зависит от индивидуальных качеств сварщика и характера сварочных работ.

Взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения и удельным пылевыведением можно выразить следующими соотношениями:

$$F_0 = 10^4 r_{\Pi} J_0 P_{\Pi} / t_{\Pi}; \quad (4.31)$$

$$F_{\max} = 10^4 r_{\Pi} J_{\max} P_{\Pi} / t_{\Pi}; \quad (4.32)$$

где J_0 — удельное пылевыведение на 1 кг израсходованных электродов при отсутствии проветривания, г/кг; J_{\max} — максимальное удельное пылевыведение на 1 кг израсходованных электродов, г/кг; P_{Π} — расход электродов на 1 м шва, кг; t_{Π} — норма времени на 10 м шва, с; r_{Π} — коэффициент, учитывающий возможное перевыполнение плана работ.

Показатели J_0 и φ , характеризующие интенсивность пылевыведения, для некоторых марок электродов приведены в табл. 2.2. Расход электродов на 1 м шва P_{Π} и норма времени на 10 м шва принимаются по нормативным данным. Коэффициент, учитывающий возможное перевыполнение плана, r_{Π} рекомендуется принимать равным 1,2.

Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания сквозной выработки по пылевому фактору при электросварочных работах, должен производиться в следующей последовательности.

1. По формуле (4.13) определяется минимальная запыленность, которая может быть достигнута при режимах проветривания, соответствующих переменной интенсивности пылевыведения.

2. Если $n_{\min} < n_d$, по формуле (4.14) определяются расходы воздуха Q_1 и Q_2 , в пределах которых запыленность воздуха не превышает допустимый уровень. К расчету принимается любое количество воздуха, удовлетворяющее условиям (4.15) и (4.16).

3. При $n_{\min} = n_d$ расход воздуха для проветривания определяется по формуле (4.12). При этом должно выполняться условие (4.16).

4. При $n_{\min} > n_d$, а также если рассчитанный по уравнениям (4.12) или (4.14) расход воздуха не обеспечивает минимально допустимую скорость вентиляционной струи, количество воздуха, необходимого для проветривания выработки, определяется по формуле (4.30).

Пример. Рассчитать количество воздуха, необходимого для проветривания сквозных выработок с площадью поперечного сечения $S_1 = 13 \text{ м}^2$ и $S_2 = 9 \text{ м}^2$ при ведении в них сварочных работ электродами ОММ-5, $n_d = 4 \text{ мг/м}^3$, $n' = 0$.

Решение. По табл. 2.2 находим для электродов ОММ-5 $F_0 = 12,6 \text{ мг/с}$, $\varphi = 3,7 \text{ с}^2/\text{м}^2$, $F_{\max} = 36,1 \text{ мг/с}$.

Для выработки с $S = 13 \text{ м}^2$:

$$n_{\min} = 0 + 2 \cdot 12,6 \sqrt{3,7}; 13 = 3,8 \text{ мг/м}^3 < n_d$$

$$Q_{1,3} = 13^2 \left[4 \pm \sqrt{4^2 - \frac{4 \cdot 12,6^2 \cdot 3,7}{13^2}} \right] : 2 \cdot 12,6 \cdot 3,7;$$

$$Q_2 = 4,6 \text{ м}^3/\text{с}; Q_3 = 9,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

С учетом условий (4.15) и (4.16) для проветривания выработки с $S = 13 \text{ м}^2$ принимаем $Q = 4,6 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для выработки с $S = 9 \text{ м}^2$:

$$n_{\min} = 0 + 2 \cdot 12,6 \sqrt{3,5} : 8 = 5,4 \text{ мг/м}^3 < n_d;$$

$$Q = F_{\max} / (n_d - n') = 36,1 : (4 - 0) \approx 9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для проветривания выработки с $S = 9 \text{ м}^2$ требуется $Q = 9 \text{ м}^3/\text{с}$.

4.7. Учет осаждения и сдувания пыли при расчете проветривания выработок

Ранее приведенные результаты исследований показали, что в рудных шахтах сдувания осевшей пыли не происходит даже при скоростях воздушного потока порядка 5—5,5 м/с. Повышенная влажность рудничного воздуха способствует слеживанию пыли и увеличивает значение критических скоростей потока, при которых происходит отрыв отдельных частиц от поверхности выработок.

В отдельных случаях сдувание пыли все же имеет место, например при включении остановленного вентилятора местного проветривания, когда скорость воздушной струи, поступающей из вентиляционной трубы, достигает больших значений. Такое явление наблюдается при расположении вентиляционных труб вблизи сухой запыленной поверхности выработок. Однако, как показали наблюдения, процесс сдувания продолжается относительно короткий отрезок времени (10—15 мин). В течение этого времени пыль уносится и сдувание прекращается. Если же выработка проветривается непрерывно, то подобных явлений не наблюдается. Учитывая это, можно сделать вывод, что процесс сдувания ранее осевшей пыли не оказывает существенного влияния на пылевой режим выработок. Поэтому при расчетах обеспыливающего проветривания его можно не учитывать.

Процесс осаждения пыли на стенках, кровле и почве горных выработок приводит к существенному снижению запыленности воздуха. Многочисленные наблюдения показывают, что запыленность воздуха в исходящей струе примерно равна запыленности воздуха, поступающего в шахту, а в некоторых случаях даже меньше последней. Поэтому процесс осаждения пыли нельзя не учитывать. Особенно это касается вентиляции выработок при последовательном расположении пылеисточников.

Рассмотрим процесс проветривания выработок при наличии рассредоточенных по длине источников пылевыделения.

В выработке имеется i источников пылевыделения, интенсивность которых при данном режиме проветривания F_1, F_2, \dots, F_i (рис. 4.8). По ней поступает воздух в количестве Q (м³/с). Начальная запыленность вентиляционной струи n' . Проходя мимо первого источника пылевыделения, интенсивность которого равна F_1 , вентиляционная струя загрязняется и концентрация пыли в потоке будет

$$n_1 = F_1/Q + n'. \quad (4.33)$$

Если второй источник находится на расстоянии L_1 , то в результате осаждения частиц на поверхности выработок запыленность воздушной струи изменится и согласно уравнению (3.18) будет равна

$$n'_1 = n_1 e^{-\alpha L_1}, \quad (4.34)$$

где

$$x = m_1 \sqrt[4]{S/Q^3}. \quad (4.35)$$

После второго источника пылевыведения запыленность воздуха возрастет и станет равной

$$n_2 = F_2/Q + (F_1/Q + n') e^{-xL_1}. \quad (4.36)$$

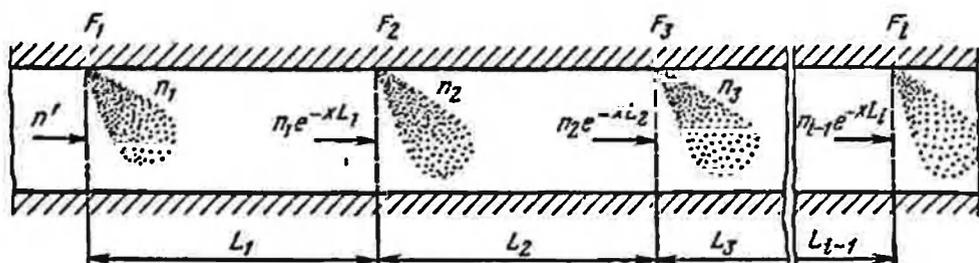


Рис. 4.8. Схема проветривания выработки с последовательно расположенными источниками пылевыведения

По аналогии с предыдущим после третьего источника

$$n_3 = F_3/Q + [F_2/Q + (F_1/Q + n') e^{-xL_1}] e^{-xL_2}; \quad (4.37)$$

после i -го источника

$$n_i = \frac{F_i}{Q} + \{ [F_{i-1}/Q + \dots + \{ F_3/Q + [F_2/Q + (F_1/Q + n') e^{-xL_1}] e^{-xL_2} \} \times e^{-xL_3} \} e^{-xL_{i-1}}. \quad (4.38)$$

После некоторых преобразований приведем уравнение (4.38) к виду

$$Q [n_i - n' e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})}] = F e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})} + F_2 e^{-x(L_2+L_3+\dots+L_{i-1})} + \dots + F_{i-1} e^{-xL_{i-1}} + F_i. \quad (4.39)$$

Как было показано ранее, интенсивность источника пылевыведения зависит от режимов проветривания и выражается уравнением (2.28).

Подставляя в уравнение (4.39) значения $F_1, F_2 \dots F_i$, получим

$$Q [n_i - n' e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})}] = F_{0_1} (1 + \varphi_1 Q^2/S^2) e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})} + F_{0_2} (1 + \varphi_2 Q^2/S^2) e^{-x(L_2+L_3+\dots+L_{i-1})} + \dots + F_{0_{i-1}} (1 + \varphi_{i-1} Q^2/S_{i-1}^2) e^{-xL_{i-1}} + F_{0_i} (1 + \varphi_i Q^2/S_i^2). \quad (4.40)$$

Концентрация пыли за последним источником пылевыведения по условиям задачи должна быть равна предельно допустимой концентрации, т. е. $n_i = n_{\pi}$.

Подставив в уравнение (4.39) вместо n_i предельно допустимую концентрацию и произведя несложные преобразования, получим

$$AQ^2 - BQ + C = 0, \quad (4.41)$$

где

$$A = \frac{F_{01}\varphi_1}{S_1^2} e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})} + \frac{F_{02}\varphi_2}{S_2^2} e^{-x(L_2+L_3+\dots+L_{i-1})} + \dots + \frac{F_{0i-1}\varphi_{i-1}}{S_{i-1}^2} e^{-xL_{i-1}} + \frac{F_{0i}\varphi_i}{S_i^2}; \quad (4.42)$$

$$B = n_d - n' e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})}; \quad (4.43)$$

$$C = F_{01} e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})} + F_{02} e^{-x(L_2+L_3+\dots+L_{i-1})} + \dots + F_{0i-1} e^{-xL_{i-1}} + F_{0i}; \quad (4.44)$$

При решении уравнения (4.41) относительно Q получим

$$Q = (B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A. \quad (4.45)$$

Подставляя в уравнение (4.45) значение B из (4.43) получим,

$$Q = [n_d - n' e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})} \pm \sqrt{[n_d - n' e^{-x(L_1+L_2+\dots+L_{i-1})}]^2 - 4AC}] / 2A. \quad (4.46)$$

Уравнение (4.46) может быть решено методом последовательных приближений. При этом возможны три случая: дискриминант положительный, дискриминант равен нулю и дискриминант отрицательный.

В первом случае будут получены два значения расхода воздуха Q_1 и Q_2 , при которых за i -м источником концентрация пыли будет равна n_d . В интервале между Q_1 и Q_2 запыленность будет меньше допустимой. Во втором случае будет получено одно значение Q , при котором запыленность за i -м источником будет равна допустимой. При любых других значениях расхода воздуха концентрация пыли за i -м источником будет больше допустимой. В третьем случае снизить запыленность за i -м источником до ПДК средствами вентиляции невозможно. Для осуществления противопылевых вентиляционных режимов необходимо уменьшить значения A и C .

Из выражений (4.42) и (4.44) следует, что уменьшить значения A и C можно одним из следующих способов:

- уменьшить число пылеисточников в выработке;
- уменьшить значения F_0 и φ , например применяя средства гидрообеспыливания;
- увеличить значение показателя степени числа e .

Последнее можно осуществить либо путем увеличения эффективности прилипания (увеличить значение коэффициента m_1), ли-

бо удлинением пути воздушной струи между отдельными источниками пылевыведения.

Решение уравнения (4.46) аналитическими методами довольно громоздко. Более простым является графический способ. Для этого решим уравнение (4.40) относительно n_i

$$n_i = \frac{1}{Q} [F_{0_1} (1 + \varphi_1 Q^2 / S_1^2) e^{-x(L_1 + L_2 + \dots + L_{i-1})} + F_{0_2} (1 + \varphi_2 Q^2 / S_2^2) e^{-x(L_2 + L_3 + \dots + L_{i-1})} + \dots + F_{0_{i-1}} (1 + \varphi_{i-1} Q^2 / S_{i-1}^2) e^{-xL_{i-1}} + F_{0_i} (1 + \varphi_i Q^2 / S_i^2)] + n' \times e^{-x(L_1 + L_2 + \dots + L_{i-1})}. \quad (4.47)$$

По уравнению (4.47) строится график зависимости n_i от Q . Абсциссы точек пересечения кривой $n_i = f(Q)$ с прямой $n = n_d$ (см. рис. 4.9) являются корнями уравнения (4.46).

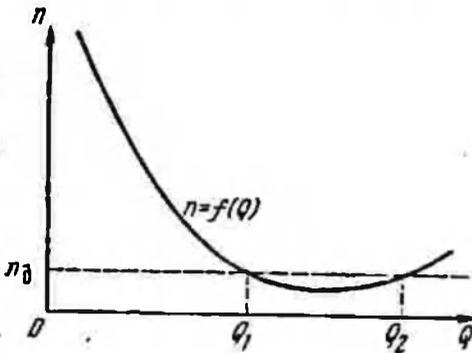
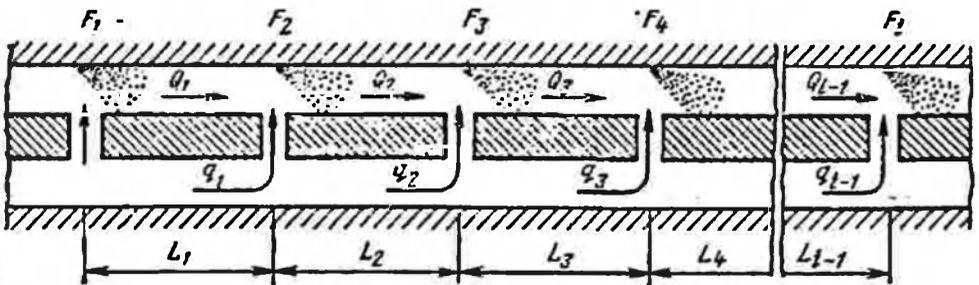


Рис. 4.9. График к решению уравнения (4.46)

Рис. 4.10. Схема проветривания выработки с подсвеживанием струи при последовательном расположении источников пылевыведения



Количества воздуха, определенного по формуле (4.46), достаточно для снижения запыленности до уровня допустимых концентраций по всей длине выработки только при соблюдении одного из следующих условий:

интенсивность отдельных источников пылевыведения и расстояния между ними равны между собой, т.е. $F_1 = F_2 = \dots = F_i$, $L_1 = L_2 = \dots = L_i$;

интенсивность последнего по ходу вентиляционной струи источника пылевыведения равна или больше, чем сумма интенсивностей пылевыведения всех других источников, т.е. $F_i \geq F_1 + F_2 + \dots + F_{i-1}$;

при равных значениях интенсивности пылевыведения расстояние между последним и предпоследним источниками пылевыведения меньше, чем расстояние между двумя любыми другими источниками.

В тех случаях, когда эти условия не соблюдаются, запыленность воздуха около отдельных источников пылевыведения может быть больше допустимой и поэтому необходимо произвести проверку. Проверка производится в тех случаях, когда при прочих равных условиях j -й источник, расположенный между первым и i -м, выделяет пыль более интенсивно, чем другие. Для проверки необходимо пересчитать расход воздуха по формуле (4.46), считая j -й источник последним. Если полученные значения расхода Q_{j_1} и Q_{j_2} вписываются в интервал $Q_1—Q_2$, определенный ранее, то для проветривания следует принимать Q_1 . В противном случае необходимо принять меры к снижению интенсивности пылевыведения j -го источника.

Так же поступают и при различных расстояниях между пылеисточниками. Если при прочих равных условиях расстояние между j -м и $(j-1)$ -м пылеисточниками меньше, чем между любыми другими, проверку производят по формуле (4.46), считая j -й источник последним по ходу вентиляционной струи.

При комбинации первого и второго случаев необходимо производить несколько проверок.

Рассмотрим второй характерный случай, когда воздух подается по основной выработке и подсвежается через боковые сбойки в местах расположения пылеисточников (рис. 4.10).

Количество воздуха, необходимое для разжижения пыли первого пылеисточника до допустимой концентрации, рассчитывается по формуле

$$Q_1 = S_1^2 \left[n_d - n' \pm \sqrt{(n_d - n')^2 - 4F_{0, \Phi_1}^2 / S_1^3} \right] / (2F_{0, \Phi_1}), \quad (4.48)$$

где S_1 — площадь поперечного сечения выработки на участке L_1 , м²; n' — содержание пыли в свежем воздухе, подаваемом для проветривания, мг/м³.

Из двух значений Q_1 , полученных по формуле (4.48), к расчету принимается меньшее. В этом случае концентрация пыли в начале участка L_1 будет равна n_d . При движении воздуха от первого пылеисточника до второго концентрация пыли в нем за счет процессов осаждения снизится до какой-то величины n'_2 . Значение n'_2 согласно зависимости (3.18) определяют по формуле

$$n'_2 = n_d e^{-y_1}, \quad (4.49)$$

где

$$y_1 = m_1 \sqrt{S_1 / Q_1^3} L_1. \quad (4.50)$$

Количество воздуха, которое необходимо подать во второй пункт, будет равно

$$Q_2 = S_1^2 \left[n_d (1 - e^{-y_1}) \pm \sqrt{n_d^2 (1 - e^{-y_1})^2 - 4F_{0_1}^2 \varphi_2 / S_2^2} \right] / (2F_{0_1} \varphi_2). \quad (4.51)$$

Для подсвеживания струи необходимо $q_1 = Q_2 - Q_1$ воздуха.

Запыленность воздуха перед третьим пылеисточником будет равна

$$n_3 = n_d e^{-y_3}, \quad (4.52)$$

где

$$y_3 = m_1 \sqrt[4]{S_2 / Q_2^3} L_3. \quad (4.53)$$

Тогда для третьего пылеисточника расход воздуха получим из уравнения

$$Q_3 = S_2^2 \left[n_d (1 - e^{-y_3}) \pm \sqrt{n_d^2 (1 - e^{-y_3})^2 - 4F_{0_2}^2 \varphi_3 / S_3^2} \right] / (2F_{0_2} \varphi_3). \quad (4.54)$$

Количество воздуха, которое необходимо подать через сбойку для подсвеживания, определится как разность расходов воздуха Q_3 и Q_2

$$q_2 = Q_3 - Q_2. \quad (4.55)$$

Запыленность воздуха, подходящего к i -му пылеисточнику, будет

$$n_i = n_d e^{-y_{i-1}}, \quad (4.56)$$

где

$$y_{i-1} = m_1 \sqrt[4]{S_{i-1} / Q_{i-1}^3} L_{i-1}. \quad (4.57)$$

Общее количество воздуха, необходимое для проветривания выработки,

$$Q_i = S_{i-1}^2 \left[n_d (1 - e^{-y_{i-1}}) \pm \sqrt{n_d^2 (1 - e^{-y_{i-1}})^2 - 4F_{0_{i-1}}^2 \varphi_i / S_i^2} \right] / (2F_{0_{i-1}} \varphi_i). \quad (4.58)$$

Расход воздуха, подаваемого для подсвеживания по $(i-1)$ -й сбойке, будет

$$q_{i-1} = Q_i - Q_{i-1}. \quad (4.59)$$

Общее количество воздуха, которое нужно подавать для подсвеживания по параллельной выработке

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_{i-1} = Q_i - Q_1. \quad (4.60)$$

При последовательном расположении источников пылевыделения желательно получить возможно большую эффективность очист-

ки воздуха от пыли за счет осаждения последней на стенках выработок.

Из уравнения (3.18) видно, что процесс осаждения пыли по длине выработки протекает тем интенсивнее, чем больше значение коэффициента m_1 , характеризующего эффективность прилипания пыли к стенкам выработки. Выполненные исследования показали, что величина коэффициента m_1 для выработок с влажными стенками больше, чем для сухих выработок. Это дало основание

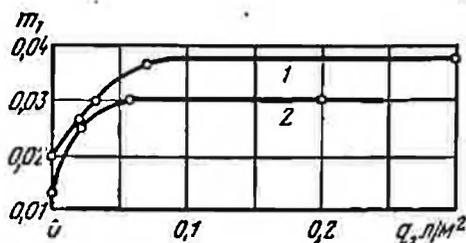


Рис. 4.11. График зависимости коэффициента m_1 от расхода воды q на увлажнение стенок выработки:

1 и 2 — соответственно при бурении шпуров без промывки и с промывкой

предположить, что процесс осаждения пыли в шахтах может быть интенсифицирован за счет увлажнения стенок выработок водой. Для того чтобы оценить эффективность этого мероприятия и определить оптимальные расходы воды на увлажнение, были выполнены специальные экспериментальные исследования на Миргалимсайском руднике. Сущность исследований заключалась в наблюдении за изменением концентрации пыли, выделяющейся при бурении шпуров, по длине выработки при различных расходах воды. Опыты проводили в сухой выработке длиной 110 м с площадью поперечного сечения 15 м². Было проведено две серии опытов: с промывкой шпуров водой и без промывки. Орошение стенок выработки производили из шланга с форсункой. Расход воды изменяли от 0,02 до 0,3 л/м² поверхности выработки. Из графиков (рис. 4.11) видно, что при увеличении расхода воды на орошение эффективность прилипания частиц к стенкам выработки растет до определенного предела. При расходах 0,06—0,07 л/м² она достигает своего максимального значения и при дальнейшем увеличении расхода воды не изменяется. Это объясняется тем, что при данном расходе воды поверхность стенок выработки смачивается полностью. Значение коэффициента m_1 при увлажнении стенок сухих выработок возрастает примерно в два раза. Орошение необходимо производить не реже одного раза в смену поливочными машинами. Удельный расход воды на орошение должен составлять 0,06—0,07 л/м².

5. РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЕ ПРОВЕТРИВАНИЕ СКВОЗНЫХ ВЫРАБОТОК

5.1. Вывод уравнения проветривания

Сущность рециркуляционного способа проветривания заключается в том, что часть воздуха, выходящего из проветриваемого

объема, по обводной выработке или по вентиляционному трубопроводу возвращается и после очистки от вредных примесей или без нее вновь подается для проветривания. Рециркуляция может осуществляться для отдельной выработки, очистного блока, выемочного участка, крыла шахты и шахты в целом:

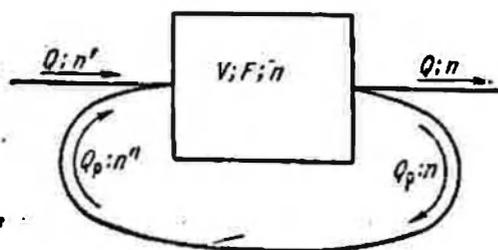


Рис. 5.1. Схема рециркуляционного проветривания

Рассмотрим процесс проветривания сквозной выработки применительно к схеме, показанной на рис. 5.1. В выработке объемом V (м^3) имеется источник непрерывного выделения вредных примесей, интенсивность которого F (мг/с). Для проветривания ее подается Q ($\text{м}^3/\text{с}$) свежего воздуха с начальным содержанием вредных примесей n' (мг/м^3). Количество рециркулирующего воздуха — Q_p ($\text{м}^3/\text{с}$). Содержание вредных примесей в возвращаемом для повторного использования воздухе за счет естественной или искусственной очистки снижается от n до n'' (мг/м^3).

Общее количество воздуха, поступающего в проветриваемую выработку,

$$Q_{\text{об}} = Q + Q_p. \quad (5.1)$$

Изменение концентрации вредных примесей в проветриваемом объеме за время dt составит

$$dn/dt = (Qn' + Q_p n'' + F - Q_{\text{об}} n)/V. \quad (5.2)$$

При исследовании рециркуляционных схем проветривания расходы свежего и рециркулируемого воздуха выражают через общий расход воздуха $Q_{\text{об}}$ и коэффициент рециркуляции $\epsilon = Q_p/Q_{\text{об}}$. Однако логично все расчеты вести относительно расхода свежего воздуха Q . В этом случае вместо коэффициента рециркуляции вводят коэффициент, характеризующий кратность использования свежего воздуха,

$$\delta = Q_p/Q. \quad (5.3)$$

Взаимосвязь между коэффициентами кратности использования воздуха и рециркуляции выражается уравнением

$$\delta = \epsilon/(1 - \epsilon). \quad (5.4)$$

Из выражений (5.1) и (5.4) следует, что

$$Q_p = \delta Q, \quad (5.5)$$

$$Q_{\text{об}} = (1 + \delta) Q. \quad (5.6)$$

Содержание вредных примесей в возвращаемом для повторного использования воздухе n'' может быть выражено через концентрацию вредных примесей n в проветриваемом объеме

$$n'' = (1 - \eta)n, \quad (5.7)$$

где η — степень очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от вредных примесей

$$\eta = (n - n'')/n. \quad (5.8)$$

Подставив значения Q_p , $Q_{об}$ и n'' из выражений (5.5) — (5.7) в уравнение (5.2) и решив его относительно n , получим

$$n = \frac{(n' + F/Q)}{(1 + \delta\eta)} + \left[n_0 - \frac{(n' + F/Q)}{(1 + \delta\eta)} \right] e^{-Qt(1 + \delta\eta)/V}, \quad (5.9)$$

где n — концентрация вредных примесей в проветриваемом объеме в любой момент времени t , мг/м³; n_0 — концентрация вредных примесей до начала проветривания, мг/м³; t — время проветривания, с.

Из уравнения (5.9) могут быть получены уравнения проветривания сквозной выработки (очистного блока, участка) по рециркуляционной схеме после взрывных работ и при непрерывном выделении вредных примесей.

При проветривании выработок после взрывных работ источники непрерывного выделения вредных примесей отсутствуют ($F=0$). В этом случае уравнение проветривания имеет вид

$$n = n'/(1 + \delta\eta) + [n_0 - n'/(1 + \delta\eta)] e^{-Qt(1 + \delta\eta)/V}. \quad (5.10)$$

Решив уравнение (5.9) относительно t при $n=n_d$, найдем время, необходимое для проветривания сквозной выработки по рециркуляционной схеме после взрывных работ,

$$t = \frac{V}{Q(1 + \delta\eta)} \ln \frac{n_0 - n'/(1 + \delta\eta)}{n_d - n'/(1 + \delta\eta)}. \quad (5.11)$$

При отсутствии очистки воздуха от ядовитых газов и пыли ($\eta=0$) время проветривания будет таким же, как при прямоточном проветривании,

$$t = \frac{V}{Q} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (5.12)$$

Это уравнение справедливо для рециркуляционных схем проветривания без обводной выработки. При наличии обводной выработки время проветривания может быть больше, чем при прямоточном проветривании, за счет увеличения загазованного объема.

В том случае, если во время взрыва заряда ВВ происходит загрязнение газами и пылью обводной выработки, продолжительность проветривания при рециркуляционной схеме увеличивается по сравнению с прямоточной схемой в $(1 + V_{об}/V)^{2/3}$ раза ($V_{об}$ — объем обводной выработки).

Если имеется возможность производить очистку возвращаемого для повторного использования воздуха от ядовитых газов и пыли, образующихся при взрывании зарядов ВВ, время проветривания при рециркуляционной схеме будет меньше, чем при прямоточном проветривании. При взрывании небольших зарядов ВВ (до 40 кг) для очистки воздуха могут быть использованы агрегаты комплексной очистки от ядовитых газов и пыли, разработанные институтом ВНИИБТГ [23]. При непрерывном проветривании, когда $i \rightarrow \infty$, второй член правой части уравнения (5.9) стремится к нулю. Пренебрегая им, получим

$$n = (n' + F/Q)/(1 + \delta\eta). \quad (5.13)$$

Полученное уравнение описывает изменение концентрации вредных примесей в сквозной выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме, при непрерывном выделении вредных примесей с постоянной интенсивностью, не зависящей от скорости вентиляционной струи (выделение природных газов, газовыделения при работе машин с двигателями внутреннего сгорания и т. п.).

Если очистка возвращаемого для повторного использования воздуха от вредных газов не производится ($\eta = 0$), уравнение проветривания выработки при рециркуляции части воздуха будет таким же, как при прямоточном проветривании

$$n = n' + F/Q. \quad (5.14)$$

Следовательно, при непрерывном выделении вредных примесей, происходящем с постоянной, не зависящей от режимов проветривания интенсивностью ($F = \text{const}$), рециркуляция даже без очистки повторно используемого воздуха не ухудшает состава рудничной атмосферы. Более того, увеличение скорости вентиляционной струи за счет рециркуляции способствует более интенсивному перемешиванию и выносу вредных примесей из проветриваемого объема. В случаях полной или частичной очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от вредных примесей ($\eta > 0$) рециркуляция позволяет сократить расходы воздуха на проветривание.

В отличие от газовой выделений интенсивность выделения пыли при большинстве производственных процессов не является постоянной величиной, а зависит от режимов проветривания. Чем больше скорость вентиляционной струи, тем больше пыли поступает в атмосферу выработок. В связи с этим увеличение скорости вентиляционной струи в проветриваемой выработке за счет рециркуляции даже при очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли может повлечь за собой повышение запыленности на рабочих местах. С другой стороны, при движении воздуха по обводной выработке (в схемах рециркуляционного проветривания с обводной выработкой) происходит естественная очистка его от пыли за счет осаждения пылевых частиц на почве, кровле и стенках выработки. Это позволяет использовать рециркуляционные схемы проветривания без искусственной очистки возвращаемого воздуха от пыли.

С точки зрения закономерностей изменения концентрации пыли в проветриваемом объеме при непрерывных пылевыведениях различают три схемы рециркуляционного проветривания сквозных выработок (очистных блоков, выемочных участков): без обводной выработки с искусственной очисткой возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли, с обводной выработкой без искусственной очистки воздуха, с обводной выработкой и искусственной его очисткой.

5.2. Проветривание без обводной выработки с искусственной очисткой воздуха от пыли

Сущность схемы проветривания (рис. 5.2) заключается в следующем. За источником непрерывного выделения пыли в выработке, считая по ходу вентиляционной струи, на расстоянии 10—15 м от него устанавливается вентилятор с фильтром-насадкой, который

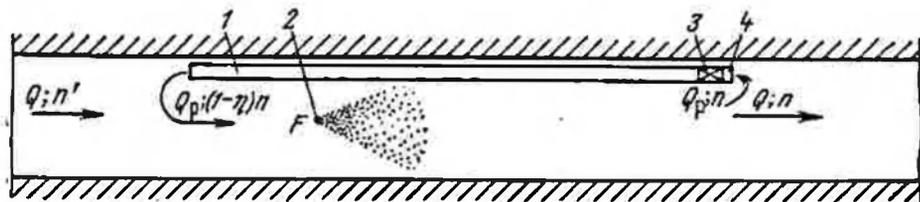


Рис. 5.2. Схема рециркуляционного проветривания без обводной выработки: 1 — трубопровод; 2 — пылесосчик; 3 — вентилятор; 4 — фильтр

забирает часть запыленного воздуха и по трубопроводу длиной 15—25 м возвращает его для повторного использования. Очищенный от пыли воздух, выходя из трубопровода, смешивается со свежим и вновь поступает к источнику пылевыведения. Количество свежего воздуха составляет Q ($\text{м}^3/\text{с}$), возвращаемого для повторного использования — δQ ($\text{м}^3/\text{с}$). Степень очистки воздуха от пыли в фильтре η_ϕ .

Зависимость интенсивности пылевыведения F ($\text{мг}/\text{с}$) от расхода свежего воздуха, подаваемого для проветривания, с учетом выражений (2.28) и (5.6) имеет вид

$$F = F_0 [1 + \varphi Q^2 (1 + \delta)^2 / S^2], \quad (5.15)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при неподвижном воздухе, $\text{мг}/\text{с}$; φ — коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения при увеличении скорости движения воздуха, $\text{с}^2/\text{м}^2$.

Подставив в (5.13) вместо \bar{F} ее значение из выражения (5.15), а вместо η — η_ϕ , получим уравнение проветривания выработки по рассматриваемой схеме

$$n = [n' + F_0/Q + F_0\varphi Q (1 + \delta)^2 / S^2] / (1 + \delta\eta_\phi). \quad (5.16)$$

При $\delta=0$ уравнение (5.16) преобразуется в уравнение (4.11), описывающее изменение концентрации пыли в сквозной выработке, проветриваемой по прямоточной схеме.

В зависимости от степени очистки воздуха от пыли в фильтре η_f и коэффициента кратности использования воздуха δ запыленность воздуха в выработке при рециркуляционной схеме проветривания может быть больше или меньше, чем при прямоточном проветривании.

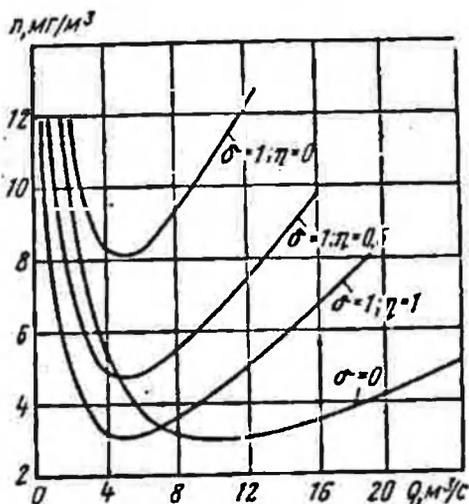


Рис. 5.3. График зависимости концентрации пыли l в выработке при рециркуляционном проветривании от расхода воздуха Q и степени очистки η его от пыли

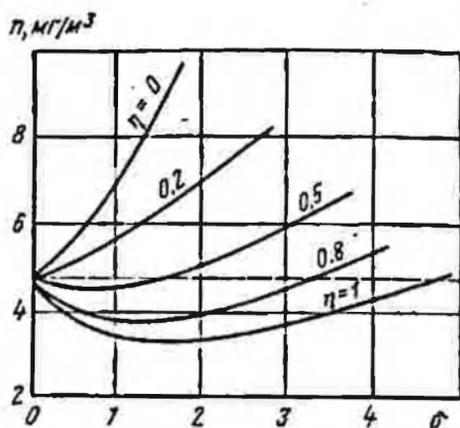


Рис. 5.4. График зависимости концентрации пыли l в выработке при рециркуляционном проветривании от кратности использования воздуха δ и степени очистки η его от пыли

На рис. 5.3 приведены построенные по уравнению (5.16) графики зависимости запыленности атмосферы в выработке с площадью поперечного сечения 7 м^2 при скреперовании увлажненной руды от расхода свежего воздуха на проветривание при постоянном значении коэффициента $\delta=1$ и разных значениях степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли. Кривая, построенная при $\delta=0$, соответствует прямоточному проветриванию.

Из приведенных графиков видно, что при рециркуляционном проветривании, так же как и при прямоточном, при увеличении расхода воздуха на проветривание запыленность в выработке вначале уменьшается, затем, достигнув минимального значения, начинает расти. При очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли при малых расходах его более низкая запыленность достигается при рециркуляционной схеме проветривания. При больших расходах воздуха, наоборот, меньшая запыленность достигается при прямоточной схеме проветривания. Если очистка возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли не производится ($\eta_f=0$), прямоточная схема проветри-

вания эффективнее рециркуляционной при любых расходах воздуха. Зависимость запыленности в выработке от расхода воздуха на проветривание в этом случае описывается уравнением

$$n = n' + F_0/Q + F_0\varphi Q(1 + \delta)^2/S^2. \quad (5.17)$$

При увеличении степени очистки возвращаемого для повторно-го использования воздуха от пыли запыленность в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме, снижается.

Приравняв правые части выражений (5.16) и (4.11) и решив полученное уравнение относительно η_ϕ , можно найти значение степени очистки воздуха от пыли, при которой запыленность в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме, будет такая же, как при прямоточном проветривании,

$$\eta_\phi = (\delta + 2)/(A_1 + 1), \quad (5.18)$$

где

$$A_1 = S^2(n'Q + F_0)/(F_0\varphi Q^2). \quad (5.19)$$

Для того чтобы рециркуляционное проветривание было эффективнее прямоточного, степень очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли должна отвечать условию

$$\eta_\phi > 2/(A_1 + 1). \quad (5.20)$$

Графики зависимости (рис. 5.4) концентрации пыли n в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме, от коэффициента δ при постоянном расходе свежего воздуха ($Q=4$ м³/с) и разных значениях степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли начинаются из одной точки, ордината которой равна запыленности воздуха в выработке, устанавливающейся при прямоточном проветривании. Кривые, построенные при степени очистки, равной 1, 0,8 и 0,5, имеют явно выраженный минимум. Причем при уменьшении степени очистки значение коэффициента δ , соответствующего минимальной запыленности воздуха, уменьшается. Кривые, построенные при степени очистки, равной 0,2 и 0, при положительных значениях δ минимума не имеют, т. е. в этих случаях более эффективной является прямоточная схема проветривания.

Чтобы рециркуляционная схема проветривания при данном расходе свежего воздуха Q и данной степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли η_ϕ была эффективнее прямоточной, значение коэффициента δ должно отвечать следующему условию:

$$0 < \delta < \eta_\phi(1 + A_1). \quad (5.21)$$

Взяв первую производную функции $n=f(\delta)$ [см. уравнение (5.16)] и приравняв ее нулю, найдем оптимальное значение коэффициента кратности использования воздуха, при котором запыленность в выработке будет минимальной

$$\delta' = \sqrt{(1/\eta_\phi - 1)^2 + A_1} - 1/\eta_\phi. \quad (5.22)$$

Если при расчете получится $\delta \leq \bar{0}$, это означает, что в данных условиях эффективнее прямоточная схема проветривания.

Подставив в (5.20) значение A_1 из (5.19) и решив полученное неравенство относительно \bar{Q} , найдем, что рециркуляционную схему проветривания следует применять при расходах воздуха, не превышающих расход \bar{Q} , определяемый из выражения

$$Q' = \frac{n' + \sqrt{(n')^2 + 4F_0^2 \varphi (2/\eta_\varphi - 1)/S^2}}{2F_0 \varphi (2\eta_\varphi - 1)/S^2}. \quad (5.23)$$

При отсутствии в свежем воздухе, подаваемом для проветривания, пыли ($n'=0$)

$$Q'_{(n'=0)} = S/\sqrt{\varphi(2/\eta_\varphi - 1)}, \quad (5.24)$$

или с учетом выражения (4.12)

$$Q'_{(n'=0)} = Q'/\sqrt{2/\eta_\varphi - 1}, \quad (5.25)$$

где Q' — расход воздуха, соответствующий минимальной запыленности воздуха при прямоточном проветривании, m^3/c .

При полной очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли ($\eta_\varphi=1$) и отсутствии в свежем воздухе, подаваемом для проветривания, пыли ($n'=0$) рециркуляционная схема проветривания эффективнее прямоточной при расходах воздуха

$$Q < Q'. \quad (5.26)$$

Подставив значение δ' из (5.22) в (5.16), получим минимальное значение запыленности, которая может быть достигнута в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме.

$$n_{\min} = 2F_0 \varphi Q [\sqrt{(1/\eta_\varphi - 1) + A_1} - (1/\eta_\varphi - 1)] / (S^2 \eta_\varphi). \quad (5.27)$$

С учетом (5.22) выражение (5.27) можно записать в виде

$$n_{\min} = 2F_0 \varphi Q (\delta' + 1) / (S^2 \eta_\varphi). \quad (5.28)$$

При полной очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли ($\eta_\varphi=1$) при рециркуляционном проветривании можно добиться меньшей по сравнению с прямоточным проветриванием запыленности воздуха в выработке. Минимальная запыленность, которую можно достигнуть при прямоточном проветривании, определяется из выражения (4.13).

При рециркуляционном проветривании в случае, если $\eta_\varphi=1$,

$$n_{\min} = 2F_0 \sqrt{\varphi} \sqrt{Q n' / F_0 + 1} / S. \quad (5.29)$$

Если поделить правую часть выражения (4.13) на первую часть уравнения (5.29) и после возведения полученного выражения в квадрат вычесть из числителя и знаменателя по 1, то с учетом выражения (4.12) получим $[1 + n'S/(4F_0 \sqrt{\varphi})] Q'/Q$. Это выражение при $Q < Q'$ больше 1. Следовательно значение n_{\min} , рассчитанное по уравнению (5.29), при соблюдении условия (5.26) меньше значения n_{\min} , рассчитанного по уравнению (4.13).

При отсутствии в свежем воздухе пыли ($n' = 0$) и полной очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от нее ($\eta_{\phi} = 1$) минимальная запыленность, достигаемая при рециркуляционной и приточной схемах проветривания, одинаковая и определяется из уравнения (4.13).

5.3. Проветривание с обводной выработкой без искусственной очистки воздуха от пыли

В отличие от вышерассмотренной схемы вентиляции при данной схеме рециркуляционного проветривания воздух, используемый для проветривания повторно, возвращается не по трубопроводу, а по обводной выработке (рис. 5.5). За счет осаждения пыли

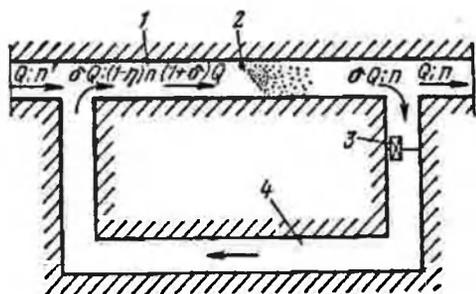


Рис. 5.5. Схема рециркуляционного проветривания с обводной выработкой:

1 — проветриваемая выработка; 2 — пыленосчик; 3 — вентилятор; 4 — обводная выработка

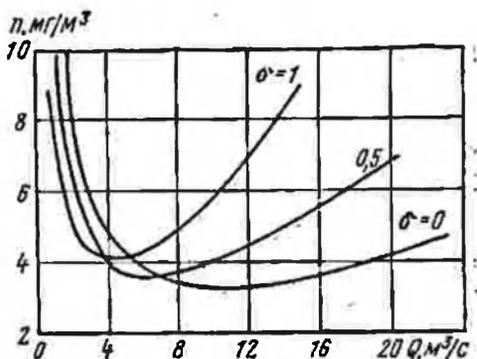


Рис. 5.6. График зависимости концентрации пыли n в выработке при рециркуляционной схеме проветривания с обводной выработкой от расхода свежего воздуха Q

на стенках, почве и кровле обводной выработки концентрация ее снижается. На степень очистки воздуха от пыли оказывают влияние не только размеры обводной выработки, но и количество запыленного воздуха, проходящего по ней. При увеличении его степень очистки воздуха от пыли уменьшается.

С учетом выражений (3.18), (5.5) и (5.8) степень очистки воздуха от пыли в обводной выработке

$$\eta = 1 - \exp\left[-m_1 L_{об} \sqrt[4]{S_{об}/(\delta^3 Q^3)}\right], \quad (5.30)$$

где $L_{об}$ — длина обводной выработки, м; $S_{об}$ — площадь поперечного сечения обводной выработки, m^2 ; m_1 — коэффициент, характеризующий интенсивность осаждения пыли, $(m/c)^{3/4}$.

Подставив значение η из (5.30) в (5.16), получим уравнение проветривания выработки по рециркуляционной схеме с обводной выработкой при непрерывных пылевыделениях

$$\pi = \frac{n' + F_n/Q + F_n \pi Q (1 + \delta)^2 / S^2}{1 + \delta [1 - \exp(-m_1 L_{об} \sqrt{S_{об} / (\delta^3 Q^3)})]} \quad (5.31)$$

На рис. 5.6 для тех же условий, что и на рис. 5.3, построены графики зависимости запыленности воздуха в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме с обводной выработкой длиной 100 м и площадью поперечного сечения 10 м², от расхода свежего воздуха на проветривание при разных значениях коэффициента кратности его использования. Значение коэффициента m_1 , характеризующего интенсивность осаждения пыли в обводной выработке, в соответствии с результатами исследований, приведенными в п. 3.4 принято равным 0,02. Кривая, построенная при $\delta=0$, соответствует прямооточному проветриванию.

Из приведенных графиков видно, что, как и при искусственной очистке возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли, рециркуляционная схема проветривания с обводной выработкой эффективнее прямооточной при малых расходах воздуха. При больших расходах воздуха эффективнее прямооточная схема проветривания.

При расходах воздуха на проветривание, превышающих значение, определяемое из выражения (4.12), прямооточное проветривание эффективнее рециркуляционного при любых условиях.

Значительное влияние на запыленность воздуха в проветриваемой выработке при рециркуляционной схеме оказывают длина обводной выработки и коэффициент кратности использования свежего воздуха.

На рис. 5.7 для тех же условий, что и на рис. 5.6, приведены график зависимости запыленности воздуха в проветриваемой выработке от длины обводной выработки при постоянном расходе свежего воздуха и разных значениях коэффициента кратности использования свежего воздуха. Прямая, построенная при $\delta=0$, соответствует прямооточному проветриванию. Из приведенных графиков видно, что при увеличении длины обводной выработки запыленность уменьшается. При небольшой ее длине запыленность в проветриваемой выработке при рециркуляционной схеме выше, чем при прямооточной. При длине обводной выработки, превышающей некоторое значение, более эффективной становится рециркуляционное проветривание. Причем, чем больше рециркуляция (коэффициент δ), тем длиннее должна быть обводная выработка.

Приравняв правые части выражений (5.31) и (4.11) и решив полученное уравнение относительно $L_{об}$, получим, что длина обводной выработки, при которой запыленность в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме, при расходе свежего воздуха Q и коэффициенте кратности его использования δ будет такая же, как и при проветривании ее по прямооточной схеме тем же количеством воздуха,

$$L_{об} = (1/m_1) \sqrt{\delta^3 Q^3 / S_{об}} \ln [(A_1 + 1)/(A_1 - 1 - \delta)]. \quad (5.32)$$

Чтобы рециркуляционная схема проветривания была эффективнее прямоточной, длина обводной выработки должна превышать величину, определяемую из выражения (5.32).

При $\delta \rightarrow 0$ выражение (5.32) также стремится к 0. Это означает, что при любой (даже очень малой) длине обводной выработки рециркуляционная схема проветривания может быть эффективнее прямоточной.

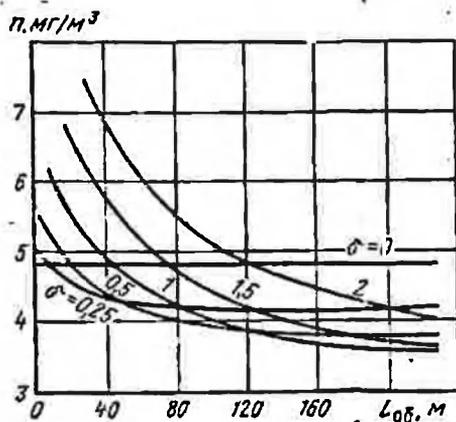


Рис. 5.7. График зависимости концентрации пыли n в проветриваемом объеме от длины обводной выработки $L_{об}$

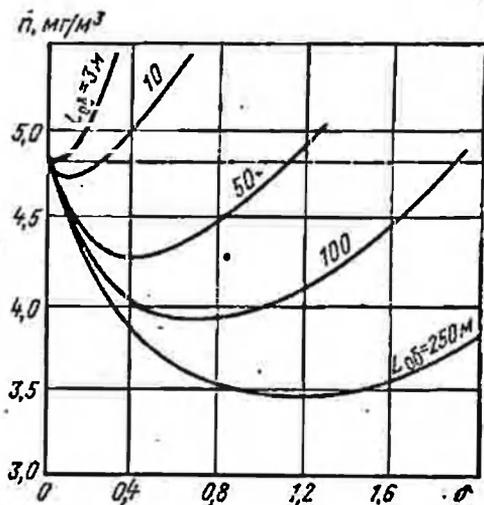


Рис. 5.8. График зависимости концентрации пыли n в проветриваемом объеме при рециркуляционной схеме с обводной выработкой в зависимости от кратности использования воздуха δ

При $\delta \rightarrow (A_1 - 1)$ значение выражения (5.32) стремится к ∞ ; т. е., для того чтобы запыленность в выработке при рециркуляционной схеме проветривания была такой же, как при прямоточной, требуется бесконечно длинная обводная выработка. Кривые изменения концентрации пыли в выработке (рис. 5.8), проветриваемой по рециркуляционной схеме с обводной выработкой, в зависимости от коэффициента кратности использования свежего воздуха при постоянном расходе его ($Q=4 \text{ м}^3/\text{с}$) и длине обводной выработки, равной 3, 10, 50, 100 и 250 м, начинаются из одной точки, ордината которой соответствует запыленности воздуха в выработке при прямоточном проветривании ($4,83 \text{ мг}/\text{м}^3$) и имеют явно выраженный минимум. Отсутствие минимума у кривой, построенной при $L_{об} = 3 \text{ м}$, говорит о том, что при данной длине обводной выработки рециркуляционная схема при любых значениях δ менее эффективна по сравнению с прямоточным проветриванием.

Чем длиннее обводная выработка, тем больше значение коэффициента кратности использования свежего воздуха, соответствующего минимальной запыленности его в проветриваемой выработке.

Наибольшее значение он будет иметь при $L_{об} \rightarrow \infty$. В этом случае уравнение проветривания имеет вид

$$n = (n' + F_0/Q)/(1 + \delta) + F_0\varphi Q(1 + \delta)^2/S^2. \quad (5.33)$$

Приравняв правые части выражений (5.33) и (5.31) и решив полученное уравнение относительно δ , найдем величину, к которой будет стремиться оптимальное значение коэффициента кратности использования воздуха при увеличении длины обводной выработки,

$$\delta'_{(L_{об} \rightarrow \infty)} = \sqrt{A_1} - 1. \quad (5.34)$$

При отсутствии пыли в свежем воздухе ($n'=0$) выражение (5.34) с учетом (5.19) и (4.12) примет вид

$$\delta'_{(L_{об} \rightarrow \infty)} = Q'/Q - 1, \quad (5.35)$$

где Q' — расход воздуха, обеспечивающий минимальную запыленность в выработке при прямоточном проветривании, м³/с.

В рассматриваемом случае при $Q'=10$ м³/с, $Q=4$ м³/с,

$$\delta'_{(L_{об} \rightarrow \infty)} = 10:4 - 1 = 1,5.$$

Для того чтобы определить оптимальное значение коэффициента кратности использования воздуха для конкретной длины обводной выработки, нужно приравнять нулю первую производную функции $n=f(\delta)$ и решить полученное уравнение относительно δ . Однако аналитическое решение получается очень громоздким. Гораздо проще значение δ' находится графическим путем. Для этого задаются несколькими значениями δ , по уравнению (5.31) находят соответствующие значения n и строят график $n=f(\delta)$. Принимать значение коэффициента кратности использования свежего воздуха при рециркуляционном проветривании больше δ' нецелесообразно.

Минимальная запыленность воздуха в выработке, проветриваемой по рециркуляционной схеме с обводной выработкой,

$$n_{\min} = \frac{n' + F_0/Q + F_0\varphi Q(1 + \delta')^2/S^2}{1 + \delta' [1 - \exp(-m_1 L_{об} \sqrt{S_{об}/(\delta' Q)})]}. \quad (5.36)$$

С целью проверки эффективности рассматриваемой схемы проветривания были проведены экспериментальные наблюдения на шахте № 5 Березовского рудника им. С. М. Кирова. Эксперименты проводились при отработке очистного блока на горизонте 170 м (рис. 5.9). Воздух для проветривания очистного забоя, представляющего собой сквозную выработку 1, подавался вентилятором 2, установленным на свежей вентиляционной струе в квершлага 3, по трубопроводу 4 и восстающему 5. Из забоя, в котором работал телескопный перфоратор 6, воздух по второму восстающему 7 поступал на основной горизонт в выработку 8, а затем частично возвра-

шался к всасу вентилятора, частично — в исходящую струю. Суммарная длина выработок, в которых происходило осаждение пылевых частиц из возвращаемого для повторного использования воздуха, составляла 94 м. Площадь поперечного сечения очистной выработки была 2,5 м², восстающих — 2 м², горизонтальной выработки 8 — 5,8 м². В восстающем 5 имелась перемычка 9.

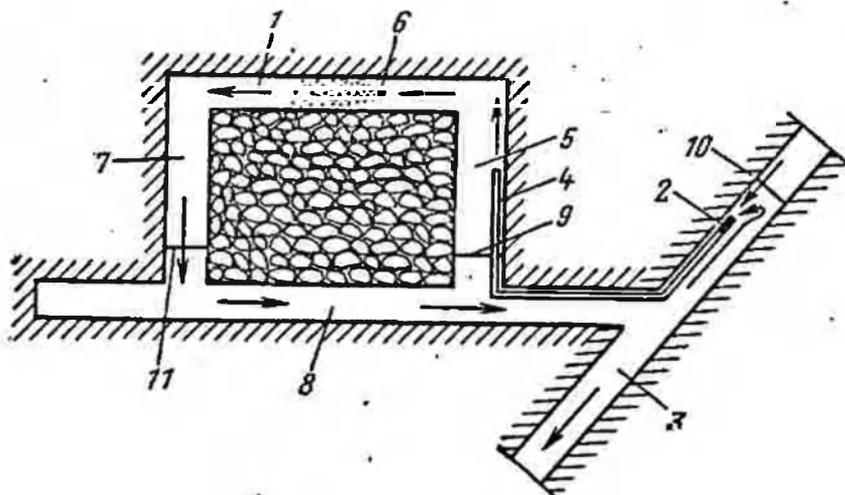
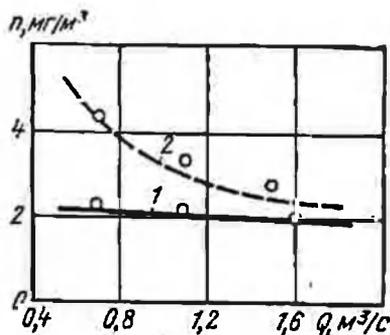


Рис. 5.9. Схема проветривания экспериментального блока

Рис. 5.10. График зависимости концентрации пыли n в экспериментальном забое при бурении шпуров от расхода свежего воздуха Q : 1 и 2 — соответственно при рециркуляционном и прямоточном проветривании



Для осуществления рециркуляционной схемы проветривания в квершлагае со стороны поступления свежего воздуха была установлена перемычка 10 с вентиляционным окном. Изменяя площадь окна, можно было регулировать количество свежего и рециркулируемого воздуха, поступающего к всасывающему отверстию вентилятора.

Сущность экспериментов заключалась в определении концентрации пыли в очистной выработке во время бурения шпуров при рециркуляционной и прямоточной схемах проветривания.

Было испытано 6 режимов проветривания, в том числе 3 при рециркуляционной и 3 при прямоточной схемах проветривания. При рециркуляционной схеме проветривания количество свежего воздуха, поступающего к всасывающему отверстию вентилятора, составляло 0,7; 1,1 и 1,6 м³/с; количество повторно используемого

для проветривания воздуха было равным 2,4; 2,0 и 1,5 м³/с соответственно. Общий расход воздуха во всех случаях составлял 3,1 м³/с. При прямоточной схеме проветривания количество воздуха, поступающего в забой, составляло 0,7; 1,1 и 1,5 м³/с. Для регулирования количества воздуха, поступающего в очистной забой при прямоточной схеме проветривания, в восстающем 7 устанавливалась перемычка 11 с вентиляционным окном.

При каждом режиме проветривания во время бурения в очистной выработке на расстоянии 10 м от бурильного молотка отбиралось не менее 6 пылевых проб. Одновременно производился отбор пылевых проб на входящей струе у перемычки 10.

Результаты экспериментов приведены на рис. 5.10. Сплошной и пунктирной линиями показано изменение расчетной запыленности воздуха в очистной выработке при рециркуляционной и прямоточной схемах проветривания, точками — усредненные результаты замеров.

Расчетная запыленность воздуха в очистном забое при прямоточной схеме проветривания определялась по уравнению (4.11).

Интенсивность пылевыделения при отсутствии движения воздуха F_0 и коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыделения ϕ , для условий эксперимента составляли соответственно 2,5 мг/с и 0,5 с²/м²; среднее значение запыленности свежего воздуха n' — 0,43 мг/м³.

Расчетную запыленность в очистной выработке при рециркуляционной схеме проветривания определяли по уравнению (5.16).

Коэффициент кратности δ использования воздуха для каждого режима проветривания определяли как отношение количества повторно используемого воздуха к расходу свежего воздуха. При первом режиме он был равен 3,43, при втором — 1,82, при третьем — 0,94.

Степень очистки повторно используемого воздуха от пыли рассчитывали по формуле (5.8).

Для определения концентрации пыли в возвращаемом для повторного использования воздухе n'' при рециркуляционной схеме проветривания производили отбор пылевых проб перед вентилятором со стороны исходящей струи. Средняя степень очистки возвращаемого в очистной забой для повторного использования воздуха от пыли по результатам 27 измерений составила 0,65.

Экспериментальные точки как при прямоточной, так и при рециркуляционной схемах проветривания удовлетворительно расположились около расчетных кривых, что подтверждает справедливость уравнений, по которым они построены.

Проведенные эксперименты показали высокую эффективность рециркуляционного проветривания. Запыленность воздуха в выработке при одних и тех же расходах свежего воздуха снизилась по сравнению с прямоточной схемой проветривания в 1,85—1,4 раза. При рециркуляционной схеме проветривания запыленность в очистном забое при изменении расхода воздуха на проветривание от 0,7 до 1,6 м³/с оставалась постоянной, близкой к ПДК (2 мг/м³).

При прямооточном проветривании увеличение расхода свежего воздуха от 0,7 до 1,5 м³/с привело к снижению запыленности с 4,3 до 2,8 мг/м³. Для достижения санитарной нормы при прямооточном проветривании потребовалось бы подавать около 3 м³/с свежего воздуха.

5.4. Проветривание с обводной выработкой и искусственной очисткой воздуха от пыли

В том случае, если длины обводной выработки недостаточно для очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли до требуемой величины и минимальная запыленность воздуха, определяемая из выражения (5.36), больше допустимой, дополнительно устанавливаются фильтры. Заслуживает внимания применение для этих целей иглопробивных тканей, которые можно устанавливать в виде перемычек на пути движения возвращаемого для повторного использования воздуха или в виде фильтро-насадок к вентиляторам. Фильтры из иглопробивных тканей обладают высокой степенью очистки (до 98 %) и большой пылеемкостью (0,25 кг/м²). Суммарная степень очистки воздуха от пыли в обводной выработке и фильтре

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{\phi}) \exp \left(- m_1 L_{об} \sqrt[4]{S_{об}/(\delta^3 Q^3)} \right). \quad (5.37)$$

Подставив в выражение (5.13) вместо \bar{F} и η их значения из (5.15) и (5.37), получим уравнение рециркуляционного проветривания сквозной выработки с обводной выработкой и искусственной очисткой воздуха от пыли при непрерывных пылевыделениях

$$n = \frac{n' + F_0/Q + F_0 \eta_{\phi} Q (1 + \delta)^2 / S^2}{1 + \delta \left[1 - (1 - \eta_{\phi}) \exp \left[- m_1 L_{об} \sqrt[4]{S_{об}/(\delta^3 Q^3)} \right] \right]}. \quad (5.38)$$

Как и при рассмотренных выше схемах рециркуляционного проветривания, при данной схеме существует оптимальное значение коэффициента кратности δ' использования свежего воздуха, обеспечивающее минимальную запыленность в проветриваемой выработке. Величина его зависит от расхода свежего воздуха на проветривание, интенсивности пылевыделения, степени очистки воздуха от пыли в фильтре, размеров обводной выработки и интенсивности осаждения пыли в ней. Определяется δ' графическим способом по методике, описанной в п. 5.3.

5.5. Экономическая оценка рециркуляционного способа проветривания

Приведенные выше результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что использование рециркуляционных схем проветривания позволяет улучшить атмосферные условия в горных выработках за счет повторного использования воздуха в шахтах.

Экономическое сравнение рециркуляционного способа проветривания с прямоточным производили по затратам энергии.

Для упрощения выводов принимали, что на шахте имеется i добычных участков с одинаковой потребностью в воздухе для проветривания. Воздух, поступающий для проветривания, разветвляется по участкам в одной узловой точке A и сходится в точке B (рис. 5.11). Утечками в вентиляционной сети пренебрегали.

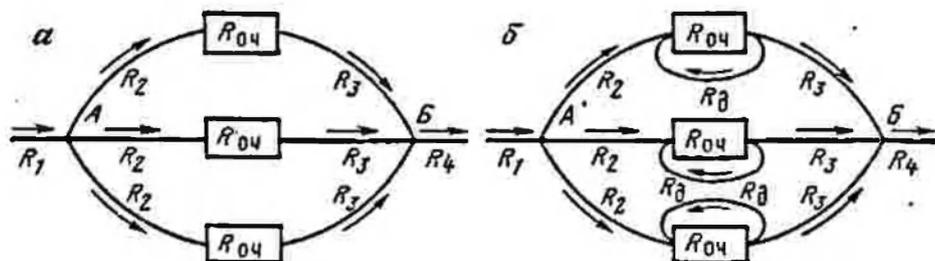


Рис. 5.11. Схема к расчету проветривания очистных забоев:
а — прямоточная; б — рециркуляционная

Через $Q_{п}$ обозначили количество воздуха, которое необходимо подавать в шахту по пылевому фактору при прямоточном проветривании выемочных участков. Тогда при проветривании участков рециркуляционным способом с коэффициентом кратности использования воздуха δ и степенью очистки от пыли η в шахту необходимо подавать его в количестве

$$Q = Q_{п}/(1 + \delta\eta). \quad (5.39)$$

С учетом (5.5) и (5.6) общее количество воздуха $Q_{об}$, поступающего по очистным выработкам, и количество рециркулирующего воздуха $Q_{р}$ составят:

$$Q_{об} = Q_{п} (1 + \delta)/(1 + \delta\eta); \quad (5.40)$$

$$Q_{р} = \delta Q_{п}/(1 + \delta\eta). \quad (5.41)$$

С учетом принятых обозначений расход энергии на проветривание шахты в единицу времени составит:
при прямоточной схеме

$$W_{п} = [R_1 + R_4 + (R_2 + R_3 + R_{оч})/i^3] Q_{п}^3, \quad (5.42)$$

при рециркуляционной схеме

$$W_{р} = \{R_1 + R_4 + [R_2 + R_3 + R_{оч} (1 + \delta)^3 + R_{об} \delta^3]/i^3\} Q_{п}^3/(1 + \delta\eta)^3, \quad (5.43)$$

где R_1 и R_4 — соответственно сопротивление основных воздухоподающих и воздуховыдающих выработок; R_2 и R_3 — соответственно сопротивление выработок, подводящих воздух к очистным блокам и отводящих от них; $R_{оч}$ — сопротивление очистных выработок; $R_{об}$ — сопротивление дополнительных обводных выработок, используемых при рециркуляционном проветривании.

Разделив (5.42) на (5.43), получим

$$\frac{W_n}{W_p} = \frac{(1 + \delta\eta)^3 [R_1 + R_4 + (R_2 + R_3 + R_{\text{оч}})^{1/3}]}{R_1 + R_4 + [R_2 + R_3 + R_{\text{оч}}(1 + \delta\eta)^3 + R_d \delta^3]^{1/3}} \quad (5.44)$$

Наибольшим сопротивлением в шахтной вентиляционной сети обладают воздухоподающие и воздуховыдающие стволы, вентиляторные установки и квершлагги, т. е. R_1 и R_4 . Сопротивление очистных и дополнительных обводных выработок по сравнению с ними мало, и при приближенной оценке ими можно пренебречь.

Уравнение (5.44) в этом случае примет вид

$$W_n/W_p = (1 + \delta\eta)^3, \quad (5.45)$$

откуда

$$W_p = W_n/(1 + \delta\eta)^3. \quad (5.46)$$

Из уравнения (5.46) следует, что затраты энергии на проветривание при увеличении рециркуляции и степени очистки повторно используемого воздуха от пыли уменьшаются. Степень очистки воздуха от пыли даже при сравнительно небольшой длине обводных выработок (до 100 м) составляет 0,65—0,75. При использовании фильтров она может достигать 0,95 и более. Если при этих условиях только 25 % воздуха, подаваемого в шахту, будет использоваться повторно, экономия энергии составит 40—45 %. Кроме того, при применении рециркуляционных схем проветривания в отдельных случаях отпадает необходимость проходки дополнительных вентиляционных стволов и горизонтальных выработок и сокращаются расходы на подогрев воздуха, подаваемого в шахту, в зимнее время.

5.6. Расчет проветривания

Расчет прямоточного проветривания горных выработок при непрерывном выделении пыли или газов заключается в определении расходов воздуха, необходимых для снижения концентрации выделяющихся вредных примесей до допустимого санитарными нормами уровня и создания скорости вентиляционной струи, обеспечивающей вынос их из рудничной атмосферы.

Необходимость в рециркуляционном проветривании возникает в том случае, если нет возможности обеспечить проветриваемую выработку (очистной блок, участок) достаточным для прямоточного проветривания количеством свежего воздуха. Поэтому расход его при рециркуляционном проветривании обычно известен. Если расход воздуха не задан, он может быть принят по минимально допустимой скорости вентиляционной струи. Расчет проветривания горных выработок рециркуляционным способом в зависимости от схемы проветривания заключается в определении значений коэффициента кратности использования воздуха, степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли или длины обводной выработки, обеспечивающей необходимую степень

очистки. На основании этих данных производится выбор вентиляторов, используемых для создания рециркуляционных потоков, и фильтров при схемах с искусственной очисткой воздуха от пыли.

Рассмотрим методику расчета этих показателей при разных схемах рециркуляционного проветривания.

Схема проветривания без обводной выработки. При данной схеме рециркуляционного проветривания для очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли предусматривается применение фильтров-насадок к вентилятору (типа ПФ-6 и др.) из нетканых иглопробивных материалов, обладающих малым сопротивлением, высокой степенью очистки и большой пылеемкостью. При этом степень очистки воздуха от пыли известна. Расчет проветривания заключается в определении минимального значения коэффициента кратности использования воздуха δ , обеспечивающего поддержание в выработке допустимого уровня запыленности при заданных значениях расхода свежего воздуха Q и степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли η_{ϕ} .

Значение коэффициента кратности использования воздуха δ определяют из уравнения (5.16), описывающего процесс изменения концентрации пыли в выработке, проветриваемой по рассматриваемой схеме. Решив это уравнение относительно δ при $n = n_d$, получим

$$\delta = B - 1 \pm \sqrt{B^2 + 2B(1/\eta_{\phi} - 1) - A_1}, \quad (5.47)$$

где A_1 — величина, определяемая из выражения (5.19);

$$B = \eta_{\phi} n_d S^2 / (2F_0 \sigma Q). \quad (5.48)$$

При расчете δ по уравнению (5.47) подкоренное выражение в зависимости от соотношения входящих в него величин может быть больше, равно или меньше нуля.

В первом случае получаются два значения δ_1 и δ_2 , ограничивающие область значений коэффициента кратности использования воздуха, при которых концентрация пыли в проветриваемой выработке не превышает допустимый уровень.

Учитывая, что сопротивление фильтра по мере насыщения его пылью увеличивается, в связи с чем количество воздуха, проходящего через него, уменьшается, значение коэффициента кратности δ использования воздуха рекомендуется принимать на 10—20 % больше δ_1 .

Во втором случае будет получено единственное значение δ , при котором запыленность воздуха равна допустимой. При всех остальных значениях δ концентрация пыли в проветриваемой выработке будет выше ПДК.

Третий случай также соответствует действительному процессу проветривания. Отсутствие действительных корней уравнения свидетельствует о том, что при данных значениях показателей, характеризующих интенсивность пылевыделения и степень очистки повторно используемого воздуха от пыли, снизить запыленность воз-

духа в выработке до ПДК только средствами вентиляции невозможно. В этом случае необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по снижению интенсивности пылевыведения, либо, если эффективность пылеулавливания выбранного фильтра недостаточно высока, выбрать другой более эффективный фильтр.

При невозможности снижения имеющимися средствами интенсивности пылевыведения до значения, при котором запыленность воздуха не будет превышать ПДК, коэффициент кратности использования воздуха принимается равным величине, определяемой из выражения (5.22). Производительность вентилятора для рециркуляции должна быть не менее величины, определяемой из выражения

$$Q_v = \delta Q. \quad (5.49)$$

Расчет депрессии вентилятора и выбор его производится по общепринятой методике [21]. Зная производительность вентилятора, определяют периодичность смены или регенерации фильтрующего элемента в фильтре-насадке

$$T = 10^6 NP / \{Q_v a [n_d t_p + n' (t_c - t_p)] \eta_\phi\}, \quad (5.50)$$

где T — продолжительность работы фильтра до достижения предельной пылеемкости, сут; N — количество материала в фильтре, м²; P — предельная пылеемкость материала фильтра, кг/м²; a — число рабочих смен в сутки; Q_v — производительность вентилятора, м³/с; η_ϕ — степень очистки воздуха от пыли в фильтре; n' — содержание пыли в свежем воздухе, подаваемом в выработку, мг/м³; n_d — предельно допустимая концентрация пыли, мг/м³; t_p — чистое время работы пылящего оборудования в течение смены, с; t_c — время работы вентилятора в течение смены, с.

Если в выработке производится последовательно несколько производственных операций, характеризующихся различной интенсивностью пылевыведения, расчет периодичности смены или регенерации фильтров производится по формуле

$$T = 10^6 NP / \left\{ Q_v a \left[\sum_{i=1}^l n_i t_{pi} + n' \left(t_c - \sum_{i=1}^l t_{pi} \right) \right] \eta_\phi \right\}, \quad (5.51)$$

где n_i — концентрация пыли в воздухе, поступающем в фильтр при i -й операции, мг/м³; t_{pi} — чистое время работы пылящего оборудования при выполнении i -й операции, с.

Значения запыленности воздуха, поступающего в фильтр при той или иной операции, определяются из уравнения (5.16). Время работы вентилятора и пылящего оборудования при расчете по формулам (5.50) и (5.51) должно приниматься по результатам хронометража. Значение предельной пылеемкости при использовании фильтров из иглопробивных тканей равно 0,25 кг/м². В целом расчет проветривания сквозной выработки по рециркуляционной схеме без обводной выработки с искусственной очисткой воздуха от пыли должен производиться в следующей последовательности.

1. Если расход воздуха для проветривания не задан, производится расчет его по минимально допустимой скорости вентиляционной струи

$$Q = v_{\min} S. \quad (5.52)$$

2. Определяется расход воздуха \bar{Q}'' , меньше которого эффективна рециркуляционная схема проветривания. Расчет ведут по уравнению (5.23). Если $Q < \bar{Q}''$, принимают рециркуляционную схему проветривания.

3. Рассчитывают значения комплексных параметров A_1 и B по формулам (5.19) и (5.48)

4. По формуле (5.27) определяют минимальную запыленность, которая может быть получена с помощью вентиляции при рециркуляционной схеме.

5. При $n_{\min} \geq n_d$ должны быть предусмотрены мероприятия по снижению интенсивности пылевыделения или выбран другой фильтр с большей степенью очистки. После чего вновь рассчитывается значение n_{\min} .

6. При $n_{\min} < n_d$ по формуле (5.47) определяют область значений коэффициента кратности использования воздуха, при которых запыленность в проветриваемой выработке не будет превышать ПДК.

К расчету принимают коэффициент кратности использования воздуха на 10—20 % больше меньшего значения его, полученного по формуле (5.47).

7. Если имеющимися средствами снизить запыленность воздуха в выработке до уровня ПДК не представляется возможным, коэффициент кратности использования воздуха принимают в соответствии с уравнением (5.22).

8. Определяют необходимую производительность вентилятора по формуле (5.49).

9. Выбирают диаметр и тип трубопровода, рассчитывают его сопротивление. Определяют депрессию вентилятора с учетом потерь в фильтре.

10. Выбирают вентилятор с соответствующей аэродинамической характеристикой.

11. По формуле (5.50) или (5.51) определяют периодичность смены или регенерации фильтра.

Пример. Определить производительность вентилятора для рециркуляционного проветривания сквозной выработки при люковой погрузке руды и рассчитать периодичность смены фильтра при следующих данных: $S=10 \text{ м}^2$; $Q=3,5 \text{ м}^3/\text{с}$; $F_0=24 \text{ мг/с}$; $\varphi=0,3 \text{ с}^2/\text{м}^2$; $n'=0,2 \text{ мг/м}^3$; $n_d=4 \text{ мг/м}^3$; $a=3$; $\eta_{\text{в}}=0,9$; $N=8 \text{ м}^2$; $\Pi=0,25 \text{ кг/м}^2$; $t_p=1,5 \text{ ч}$; $t_c=6 \text{ ч}$.

Решение:

$$Q'' = [0,2 + \sqrt{(0,2)^2 + 4 \cdot 24^2 \cdot 0,3 (2:0,9 - 1):10^2}]: [2 \cdot 24 \times \\ \times 0,3 (2:0,9 - 1):10^2] = 17,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как $Q < \bar{Q}''$, рециркуляционная схема проветривания эффективнее прямой.

$$A = 10^2 (0,2 \cdot 3,5 + 24):0,3:24:3,5^2 = 28;$$

$$B = 0,9 \cdot 4 \cdot 10^2 : 2 : 0,3 : 24 : 3,5 = 7,14;$$

$$n_{\min} = 2 \cdot 24 \cdot 0,3 \cdot 3,5 \sqrt{(1:0,9 - 1)^2 + 28} - \\ - (1:0,9 - 1) : 10^2 : 0,9 = 2,9 \text{ мг/м}^3;$$

$$n_{\min} < n_d;$$

$$\delta_{1,2} = 7,14 - 1 \pm \sqrt{7,14^2 + 2 \cdot 7,14 (1:0,9 - 1) - 28} = 6,14 \pm 4,94;$$

$$\delta_1 = 1,2; \quad \delta_2 = 11,08.$$

Принимаем $\delta = 1,4$.

Производительность вентилятора для создания требуемой рециркуляции должна быть равной

$$Q_v = 1,4 \cdot 3,5 = 4,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Периодичность смены фильтров определяем по формуле (5.50), так как других производственных операций, сопровождающихся пылевыведением, в выработке не производится.

$$T = 10^6 \cdot 8 \cdot 0,25 : \{4,9 \cdot 3 \cdot 0,9 [4 \cdot 1,5 \cdot 3600 + 0,2 (6 - 1,5) \cdot 3600]\} = 6 \text{ сут}.$$

Схема проветривания без искусственной очистки повторно используемого воздуха от пыли. При проветривании сквозных выработок по рециркуляционной схеме без искусственной очистки повторно используемого воздуха от пыли необходимо проведение обводной выработки разной длины, где происходит естественное самоочищение воздуха от пыли за счет осаждения пылевых частиц на стенках, почве и кровле выработки. Чем длиннее эта выработка, тем выше степень очистки его от пыли. Увеличение кратности использования воздуха, наоборот, уменьшает эффективность естественной очистки.

Расчет проветривания заключается в определении минимальных значений коэффициента кратности использования воздуха и длины обводной выработки, обеспечивающих при данном расходе свежего воздуха снижение концентрации пыли в проветриваемом объеме до ПДК, либо одной из этих величин. В отдельных случаях необходимо определять расход свежего воздуха.

При расчетах проветривания возможны несколько вариантов задач.

Вариант 1. При известных значениях расхода свежего воздуха Q и длины обводной выработки $L_{об}$ определить минимальное значение коэффициента кратности использования воздуха δ , обеспечивающего снижение запыленности в проветриваемом объеме до предельно допустимой концентрации n_d .

Значение коэффициента кратности использования воздуха находят путем графического решения уравнения (5.31) относительно δ при $n = n_d$.

Для этого при разных значениях δ по уравнению (5.31) определяют n и строят график зависимости n от δ . Абсцисса точки пересечения нисходящей ветви с прямой, соответствующей уровню ПДК, равна коэффициенту кратности использования воздуха δ . При построении графика $n = f(\delta)$ следует иметь в виду, что воздух для повторного использования может возвращаться не по одной выработке, а по системе последовательно соединенных выработок

с различной площадью поперечного сечения. В этом случае уравнение (5.31) должно быть записано в виде

$$n = \frac{n' + F_0/Q + F_0TQ(1 + \delta)^2/S^2}{1 + \delta \left\{ 1 - \exp \left[-m_1 \left(\sum_{i=1}^l L_{об_i} \sqrt[4]{S_{об_i}/\delta^2} + L \sqrt{S/(1 + \delta)^2} \right) / \sqrt[3]{VQ^3} \right] \right\}} \quad (5.53)$$

где $L_{об_i}$ и $S_{об_i}$ — соответственно длина и площадь поперечного сечения выработок обводной системы, м и м²; i — число выработок, входящих в обводную систему; L и S — соответственно длина и площадь поперечного сечения проветриваемой выработки, м и м².

Если кривая $n=f(\delta)$ не пересекается с прямой $n=n_d$, предусматривают дополнительные мероприятия по снижению интенсивности пылевыделения или интенсификации процесса осаждения пыли в обводной выработке.

Пример. Определить минимальное значение коэффициента кратности использования воздуха при рециркуляционной схеме проветривания с обводной выработкой, достаточное для снижения запыленности в проветриваемой выработке до ПДК: $F_0=16,6$ мг/с; $\varphi=0,5$ с²/м²; $Q=4$ м³/с; $S=7$ м²; $L_{об}=150$ м; $S_{об}=10$ м²; $m_1=0,02$; $n_d=4$ мг/м³.

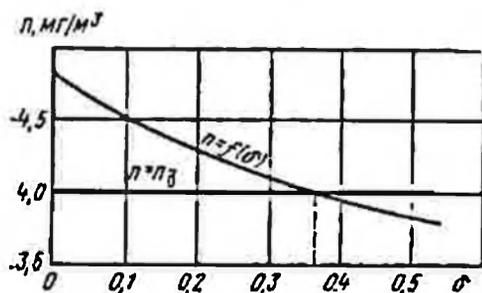


Рис. 5.12. График к решению задачи о нахождении минимального значения коэффициента кратности использования воздуха

Решение. 1. Задавшись рядом значений δ , рассчитываем по уравнению (5.31) соответствующие значения n .

δ	0	0,25	0,5
n	4,83	4,17	3,83

- Строим график зависимости $n=f(\delta)$ (рис. 5.12).
- Проводим прямую $n=n_d$.
- Опускаем перпендикуляр из точки пересечения кривой $n=f(\delta)$ с прямой $n=n_d$ на ось абсцисс.

Для снижения концентрации пыли до ПДК коэффициент кратности использования воздуха должен быть не менее 0,36.

Вариант 2. При известных значениях расхода свежего воздуха и показателей пылевыделения определить коэффициент кратности использования воздуха и минимальную длину обводной выработки, обеспечивающие снижение запыленности до ПДК.

Такая задача возникает в том случае, когда нет выработок, которые можно использовать в качестве обводных. Поэтому должно быть выбрано такое значение коэффициента кратности использования воздуха, при котором потребуются минимальная длина обводной выработки.

Зависимость требуемой степени очистки воздуха от коэффициента кратности его использования, исходя из выражения (5.16) может быть описана уравнением

$$\eta = [n' + F_0/Q + F_0\varphi Q(1 + \delta)^2/S^2 - n_d]/(n_d\delta). \quad (5.54)$$

С учетом выражения (4.11) уравнение (5.54) можно представить в виде

$$\eta = (n_n - n_d + F_0\varphi Q\delta^2/S^2 + 2F_0\varphi Q\delta/S^2)/(n_d\delta), \quad (5.55)$$

где n_n — концентрация пыли, которая была бы в проветриваемой выработке при прямоточном проветривании данным количеством воздуха, мг/м³.

Взяв первую производную функции $\eta = f(\delta)$ и приравняв ее нулю, найдем, что требуемая степень очистки воздуха от пыли η будет иметь минимальное значение при

$$\delta = S\sqrt{(n_n - n_d)/(F_0\varphi Q)}. \quad (5.56)$$

Подставив полученное значение δ в выражение (5.55), можно найти минимальное значение степени очистки повторно используемого воздуха от пыли, при котором можно достигнуть санитарного уровня запыленности в проветриваемой выработке при данном расходе свежего воздуха,

$$\eta = 2F_0\varphi Q(1 + S\sqrt{(n_n - n_d)/(F_0\varphi Q)})/(n_d S). \quad (5.57)$$

Приравняв правые части выражений (5.53) и (5.57) и решив полученное уравнение относительно $L_{об}$, получим выражение для определения минимальной длины обводной выработки, обеспечивающей требуемую степень очистки воздуха от пыли.

$$L_{об, мин} = (1/m)\sqrt[4]{\delta^3 Q^3/S_{об}} \ln[1/(1 - \eta)] - L\sqrt[4]{S\delta^3/[S_{об}(1 + \delta)^3]}. \quad (5.58)$$

В соответствии с вышеизложенным расчет рециркуляционного проветривания сквозных выработок при известном расходе свежего воздуха должен производиться в следующей последовательности.

1. Определяют концентрацию пыли в выработке при прямоточном проветривании по формуле (4.11).

Если $n_n > n_d$, выбирается рециркуляционная схема проветривания.

2. По формуле (5.56) находится значение коэффициента кратности использования воздуха, при котором требуется минимальная степень очистки повторно используемого воздуха от пыли.

Если нет возможности при организации проветривания создать рециркуляцию в соответствии со значением δ , рассчитанным по уравнению (5.56), из-за большой величины его к расчету принимается максимально возможная величина δ .

3. По уравнению (5.55) рассчитывают требуемую степень очистки воздуха от пыли.

Если δ принято в соответствии с уравнением (5.56), требуемую степень очистки воздуха от пыли можно определять по формуле

$$\eta = 2F_0\varphi Q(1 + \delta)/(n_d S^2). \quad (5.59)$$

4. По уравнению (5.58) находится минимальная длина обводной выработки, необходимая для обеспечения требуемой степени очистки возвращаемого для повторного использования воздуха от пыли.

Пример. Определить коэффициент кратности использования воздуха и длину обводной выработки, необходимые для снижения запыленности до ПДК в сквозной выработке при бурении восстающих шпуров ($F_0=4,9$ мг/с; $\varphi=0,5$ с²/м²) при расходе свежего воздуха $Q=2$ м³/с. Площадь поперечного сечения выработки $S=6$ м², длина $L=30$ м. Начальное содержание пыли в свежем воздухе $n' = 0,2$ мг/м³; $n_d = 2$ мг/м³; $m_1 = 0,02$; $S_{об} = 6$ м².

Решение:

$$n_n = 0,2 + 4,9 \cdot 2 + 4,9 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 6^2 = 2,79 \text{ мг/м}^3.$$

Так как $n_n > n_d$, выбираем рециркуляционную схему проветривания

$$\delta = 6 \sqrt{(2,79 - 2) : 4,9 : 0,5 : 2} = 2,4;$$

$$\eta = 2 \cdot 4,9 \cdot 0,5 \cdot 2 (1 + 2,4) : 2 \cdot 6^2 = 0,46;$$

$$L_{об} = \sqrt[4]{2,4^3 \cdot 2^3 : 6 \ln [1 : (1 - 0,46)] : 0,02} - 30 \sqrt[4]{6 \cdot 2,4^3 : 6 : (1 + 2,4)^3} = 41 \text{ м.}$$

Схема проветривания с обводной выработкой и искусственной очисткой воздуха от пыли. Как уже отмечалось, данная схема проветривания применяется в том случае, когда существующая обводная выработка не обеспечивает требуемой степени очистки воздуха от пыли.

При известных значениях расхода свежего воздуха и длины обводной выработки расчет проветривания производится в следующей последовательности.

1. По уравнению (4.11) определяют запыленность в проветриваемой выработке при прямоточной схеме.

Если $n_n > n_d$, выбирается рециркуляционная схема проветривания.

2. Строят график зависимости $n = f(\delta)$ по уравнению (5.31). Если построенная кривая не пересекается с прямой уровня ПДК или пересекается при большом значении коэффициента кратности использования воздуха, обеспечить который при организации проветривания будет невозможно, выбирают фильтр для дополнительной очистки воздуха от пыли.

3. Строят график зависимости $n = f(\delta)$ по уравнению (5.38). Абсцисса точки пересечения построенной кривой с прямой $n = n_d$ будет соответствовать требуемой величине коэффициента кратности использования воздуха δ .

Если кривая, построенная по уравнению (5.38), проходит выше уровня ПДК, это означает, что с помощью одной вентиляции при данных условиях снизить запыленность воздуха до ПДК невозможно. В этом случае необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по снижению интенсивности пылевыделения.

6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПРОВЕТРИВАНИЕ ОЧИСТНЫХ БЛОКОВ С ВРЕМЕННЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

6.1. Сущность способа проветривания

При разработке рудных месторождений очень часто рабочие блоки находятся на разных горизонтах. Поэтому возникает необходимость последовательного их проветривания. В этом случае дробление негабаритов и ликвидацию завесаний в рудовыпускных воронках, а также и другие виды взрывных работ приходится производить во время междусменных перерывов или выводить на время взрывания и проветривания людей из следующих по ходу вентиляционной струи забоев. Это приводит к вынужденным простоям и снижению производительности труда. Так, например, на Березовском руднике им. С. М. Кирова простои по этой причине в некоторых забоях составляют значительную часть рабочей смены. На практике в целях снижения этих простоев ограничивают время проветривания очистных выработок при внутрисменном взрывании до 5 мин и менее. Однако ограничение времени проветривания ведет к повышению расхода воздуха, подаваемого в шахту, и увеличению производительности вентиляторов главного проветривания. К тому же увеличение расхода воздуха на проветривание не решает проблемы внутрисменного ведения взрывных работ при последовательном проветривании забоев, так как не исключается опасность отравления людей ядовитыми газами.

Решение этой проблемы за счет проведения специальных вентиляционных выработок, исключающих попадание отработанного воздуха на вышележащие рабочие горизонты, требует дополнительных трудовых и материальных затрат на проведение и поддержание этих выработок.

В угольных шахтах успешно решается аналогичная проблема при разгазировании тупиковых горных выработок, заполненных метаном [21, 22]. Однако способы разгазирования, применяемые на угольных шахтах, не могут быть использованы для проветривания очистных блоков рудных шахт при внутрисменном взрывании. При их применении простои в следующих по ходу вентиляционной струи забоях исключаются, но время на проветривание выработок значительно возрастет.

В Свердловском горном институте разработан способ последовательного проветривания очистных забоев, позволяющий осуществлять внутрисменное взрывание по дроблению негабаритов и ликвидации завесаний в рудовыпускных воронках без остановки работ в следующих по ходу вентиляционной струн забоях и увеличения расхода воздуха на проветривание. Сущность его заключается в перепуске вредных примесей, образующихся при взрывании заряда ВВ, в нерабочую выработку и последующем регулируемом выпуске их из нее.

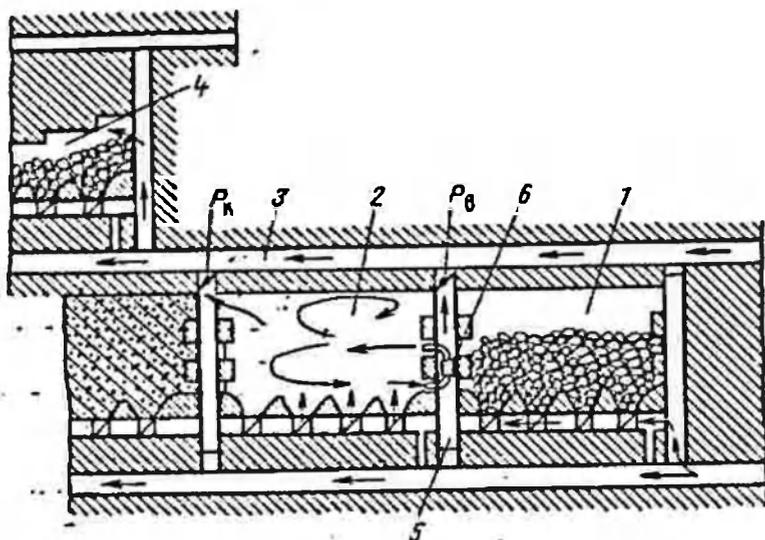


Рис. 6.1. Схема последовательного проветривания блоков с временным аккумулярованием вредных примесей

На рис. 6.1 показана схема последовательного проветривания очистных блоков, расположенных на разных горизонтах, применительно к условиям Березовского рудника им. С. М. Кирова. Воздух из очистного блока 1, через отработанную камеру 2 выдается на откаточный штрек 3 вышележащего горизонта, смешивается с идущим по нему свежим воздухом и поступает для проветривания блока 4. За счет изменения положения регуляторов P_k и P_v весь воздух или часть его могут быть направлены на вышележащий горизонт по восстающему 5, минуя камеру 2.

После взрывания заряда ВВ на горизонте скреперования очистного блока 1 и перепуска образовавшихся вредных примесей в камеру 2 регулятор P_k закрывается, а P_v — открывается. Весь воздух, выходящий из блока, поступает на вышележащий горизонт по восстающему 5. Загрязненный воздух, поступивший в камеру 2, перемешивается вентилятором-турбулизатором 6, который имеет два коротких трубопровода, направленных в камеру. Его назначение усреднять содержание ядовитых газов и пыли в объеме камеры.

По окончании перемешивания загрязненного воздуха в камере приступают к выпуску вредных примесей из нее на вышележащий горизонт.

Интенсивность выпуска должна быть такой, чтобы концентрация вредных примесей в штреке 3 в любой момент времени не превышала допустимый уровень. Для этого должно выдерживаться условие

$$Q_k (k_n^k n^k + n') + Q_b n' + Q_w n'' \leq (Q + Q_w) n_d \quad (6.1)$$

где Q_k — количество воздуха, проходящего через аккумулирующую камеру, м³/с; Q_b — количество воздуха, проходящего по восстающему, м³/с; Q — количество воздуха, подаваемого для проветривания блока 1, м³/с; Q_w — количество свежего воздуха, поступающего по штреку 3, м³/с; k_n^k — коэффициент полезного действия вентиляционной струи, проветривающей аккумулирующую камеру; n^k — содержание вредных примесей в аккумулирующей камере, мг/м³; n' и n'' — соответственно содержание вредных примесей в свежем воздухе, подаваемом для проветривания блока 1, и в воздухе, подаваемом для подсвеживания струи по штреку 3, мг/м³; n_d — предельно допустимая концентрация вредных примесей, мг/м³.

Для того чтобы не увеличивалась продолжительность проветривания очистного забоя блока 1, в любой момент времени должно выдерживаться условие

$$Q = Q_k + Q_b \quad (6.2)$$

С учетом зависимости (6.2) условие (6.1) может быть приведено к виду

$$Q_k k_n^k n^k \leq Q(n_d - n') + Q_w(n_d - n'') \quad (6.3)$$

Левая часть уравнения (6.3) представляет собой интенсивность выноса вредных примесей, образовавшихся при взрыве заряда ВВ, на вышележащий горизонт, т. е. количество вредных примесей, выносимых в единицу времени. Правая часть характеризует величину максимально допустимой интенсивности выноса вредных примесей на вышележащий горизонт. С учетом этого основное условие последовательного проветривания забоев после взрывных работ с временным аккумулированием вредных примесей может быть записано в виде

$$Q_k k_n^k n^k \leq F_d \quad (6.4)$$

где F_d — максимально допустимая интенсивность выноса образованных при взрыве заряда ВВ вредных примесей из первого забоя в вентиляционную струю поступающую ко второму забою, мг/с.

$$F_d = Q(n_d - n') + Q_w(n_d - n'') \quad (6.5)$$

Регулирование выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки может производиться ступенчато и плавно.

При ступенчатом регулировании по окончании перемешивания загрязненного воздуха в аккумулирующей выработке с помощью регуляторов P_K и P_B устанавливаются расходы воздуха Q_K и Q_B в соответствии с условиями (6.4) и (6.2). После того как концентрация вредных примесей в аккумулирующей выработке снизится до величины, при которой можно будет весь воздух направить через нее, не нарушая условия (6.4), регулятор P_B закрывается, а регулятор P_K открывается, и весь воздух, выходящий из блока 1, направляется на вышележащий горизонт через аккумулирующую выработку.

Недостатком этого варианта проветривания является то, что выпуск вредных примесей из аккумулирующей выработки на вышележащий горизонт только в первые моменты после изменения режимов проветривания производится с максимально допустимой интенсивностью. В остальное время интенсивность выноса меньше F_d . В связи с этим увеличивается время проветривания аккумулирующей камеры.

При плавном регулировании выпуска вредных примесей расход воздуха, проходящего через аккумулирующую выработку, по мере снижения концентрации вредных примесей в ней постепенно увеличивается. Количество воздуха, выдаваемого на вышележащий горизонт по восстающему, соответственно снижается. Регулирование расходов воздуха производится таким образом, чтобы вынос вредных примесей из аккумулирующей выработки происходил все время с максимально допустимой интенсивностью, т. е. чтобы в любой момент времени выдерживалось условие

$$Q_K k_n^n = F_d \quad (6.6)$$

Недостатком этого варианта проветривания является сложность плавного регулирования расходов воздуха, проходящего через аккумулирующую выработку и восстающий. Однако в связи с тем, что время проветривания аккумулирующей выработки уменьшается, он дает возможность более часто производить взрывание. В отдельных случаях это является главным при выборе способа проветривания.

Если величина взрываемого заряда $ВВ$ небольшая, а объем аккумулирующей выработки значительный, концентрация вредных примесей в ней может быть такой, что загрязненный воздух можно сразу выпускать на вышележащий горизонт. Это наиболее благоприятный вариант для использования рассматриваемого способа проветривания, так как не требует какого-либо регулирования воздухораспределения.

6.2. Уравнения проветривания аккумулирующей выработки по пылевому и газовому факторам

Основными вредными примесями, загрязняющими рудничную атмосферу при взрывных работах, являются пыль и ядовитые газы (окись углерода, окислы азота и др.).

Уменьшение содержания пыли в аккумулирующей выработке происходит не только за счет выноса ее вентиляционной струей, но и за счет осаждения пылевых частиц.

Пусть средняя концентрация пыли в аккумулирующей выработке перед началом выпуска загрязненного воздуха из нее составляет n_0^k мг/м³. Выпуск вредных примесей производится с максимально допустимой интенсивностью, для чего расходы воздуха Q_k и Q_b изменяются таким образом, что в любой момент времени соблюдалось условие (6.6).

За время t , прошедшее с начала регулируемого выпуска, количество пыли в аккумулирующей выработке уменьшится на величину

$$q = (n_0^k - n^k) V_k, \quad (6.7)$$

где n^k — концентрация пыли в выработке в момент времени t , мг/м³.

Количество пыли, вынесенной из нее за это время вентиляционной струей,

$$q_b = q - q_{oc}, \quad (6.8)$$

где q_{oc} — количество пыли, осевшей на почву, кровлю и бока аккумулирующей выработки за время t , мг.

С учетом уравнения (2.14) количество осевшей за время t пыли

$$q_{oc} = n_0^k V_k [1 - \exp(-\omega S_{\pi} t / V_k)], \quad (6.9)$$

где ω — суммарная скорость осаждения частиц, м/с (при взрывных работах $\omega = 0,004 \div 0,01$ м/с); S_{π} — площадь почвы аккумулирующей выработки, м²; V_k — объем аккумулирующей выработки, м³.

Подставив в выражение (6.8) значения q и q_{oc} из (6.7) и (6.9), получим

$$q_b = [n_0^k \exp(-\omega S_{\pi} t / V_k) - n^k] V_k. \quad (6.10)$$

С другой стороны, количество пыли, вынесенной из аккумулирующей выработки за время t ,

$$q_b = F_d t. \quad (6.11)$$

Приравняв правые части выражений (6.10) и (6.11) и решив полученное уравнение относительно n^k , найдем закон, по которому должна изменяться средняя концентрация пыли в аккумулирующей выработке во время регулируемого выпуска,

$$n^k = [n_0^k - F_d t \exp(-\omega S_{\pi} t / V_k)] / V_k + n'. \quad (6.12)$$

Подставив в выражение (6.6) значение n^k из (6.12) и решив полученное уравнение относительно \bar{Q}_k , найдем закон, по которому должен изменяться расход воздуха через регулятор P_k ,

$$Q_k = F_d / \{k_n^k [n_0^k - F_d t \exp(-\omega S_{\pi} t / V_k)] / V_k\}. \quad (6.13)$$

В начале выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки ($t=0$) расход воздуха через нее

$$Q_{\kappa}(t=0) = F_{\kappa} / (k_{\kappa}^* n_0^*). \quad (6.14)$$

В конце регулируемого выпуска при $t=t_p$ (t_p — время регулируемого выпуска)

$$Q_{\kappa}(t=t_p) = Q. \quad (6.15)$$

Начальный расход воздуха через регулятор P_b

$$Q_{\nu}(t=0) = Q - F_{\nu} / (k_{\nu}^* n_0^*). \quad (6.16)$$

В конце регулируемого выпуска

$$Q_{\nu}(t=t_p) = \bar{Q}. \quad (6.17)$$

После того, как расход воздуха через аккумулирующую выработку достигнет Q , изменение концентрации пыли в ней будет происходить по уравнению

$$n_{\kappa}^*(t > t_p) = \left[n_0^* - \frac{F_{\kappa} t_p}{V_{\kappa}} \exp\left(-\frac{\omega S_{\kappa}}{V_{\kappa}} t_p\right) \right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{t-t_p}{V_{\kappa}} (k_{\kappa}^* Q + \omega S_{\kappa})\right] + n'. \quad (6.18)$$

Время регулируемого выпуска может быть найдено путем графического решения уравнений (6.13) и (6.15).

Средняя концентрация ядовитых газов в аккумулирующей выработке, для того чтобы она проветрилась как можно быстрее, должна изменяться во время регулируемого выпуска по уравнению

$$n^{\kappa} = n_0^{\kappa} - F_{\kappa} / V_{\kappa} + n'. \quad (6.19)$$

Для этого количество воздуха, проходящего через регулятор P_{κ} , должно изменяться по закону

$$Q_{\kappa} = V_{\kappa} / [k_{\kappa}^* (n_0^* V_{\kappa} / F_{\kappa} - t)]. \quad (6.20)$$

Расходы воздуха через регуляторы P_{κ} и P_b в начале и конце регулируемого выпуска определяются в соответствии с уравнениями (6.14) — (6.17).

Изменение концентрации ядовитых газов в аккумулирующей выработке по окончании регулируемого выпуска происходит по закону, описываемому уравнением

$$n_{\kappa}^*(t > t_p) = (n_0^* - F_{\kappa} / V_{\kappa}) \exp[-(t-t_p) Q k_{\kappa}^* / V_{\kappa}] + n'. \quad (6.21)$$

При ступенчатом выпуске вредных примесей из аккумулирующей выработки начальные значения \bar{Q}_{κ} и \bar{Q}_b находятся из выражений (6.14) и (6.16).

Изменение концентрации вредных примесей в аккумулирующей выработке во время выпуска их на вышележащий горизонт при варианте проветривания с плавным регулированием выпуска вред-

ных примесей происходит вначале по прямой, описываемой уравнениями (6.12) и (6.19), затем по экспоненциальной кривой, описываемой уравнениями (6.18) и (6.21).

При варианте проветривания со ступенчатым регулированием выпуска вредных примесей концентрация их изменяется вначале по кривым, описываемым уравнениями:
для пыли

$$n_k = n_0^k \exp[-t(k_n^k Q_k + \omega S_n)/V_k] + n'; \quad (6.22)$$

для газов

$$n_k = n_0^k \exp(-k_n^k Q_k t/V_k) + n'; \quad (6.23)$$

затем — по кривым, описываемым уравнениями:
для пыли

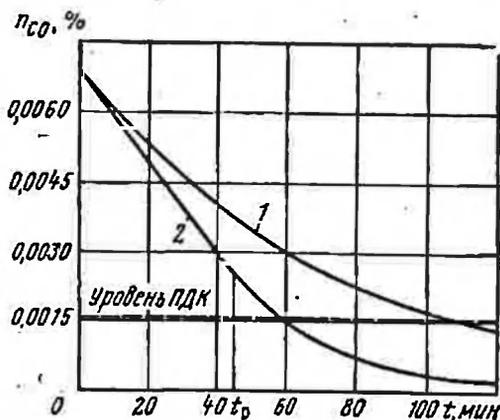
$$n_{(t>t_p)}^k = n_0^k \exp\{-[k_n^k Q_k t_p + k_n^k Q(t-t_p) + \omega S_n t]/V_k\}; \quad (6.24)$$

для газов

$$n_{(t>t_p)}^k = n_0^k \exp\{-[k_n^k Q_k t_p + k_n^k Q(t-t_p)]/V_k\}. \quad (6.25)$$

Рис. 6.2. График зависимости концентрации n_{CO} в аккумулирующей камере от времени t :

1 — при постоянных нерегулируемых расходах воздуха Q_{Σ} и Q_{Σ} ; 2 — при регулировании Q_k и Q_{Σ} .



На рис. 6.2 показано изменение концентрации ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода в аккумулирующей выработке объемом 3000 м³ после взрыва 5 кг ВВ в период выпуска их на вышележащий горизонт при вариантах проветривания с постоянными нерегулируемыми (кривая 1) и с регулируемыми (кривая 2) расходами воздуха.

Из приведенных графиков видно, что регулирование расходов воздуха, поступающего через аккумулирующую выработку и восстанавливающий, значительно уменьшает время ее проветривания.

6.3. Выбор определяющего фактора для расчета проветривания

Произведем сравнительную оценку значений Q_k , получаемых по пылевому и газовому факторам.

Для упрощения расчетов принимаем, что вредные примеси в свежем воздухе, подаваемом для проветривания, и в воздухе, подаваемом для подсыхания исходящей из первого забоя вентиляционной струи, отсутствуют ($n' = 0$, $n'' = 0$). Поскольку в аккумуляющей выработке постоянно работает вентилятор-турбулизатор, перемешивающий в нем воздух, значение k_n^* принимаем равным 1.

Уравнения (6.13) и (6.20) для определения расхода воздуха, проходящего через аккумуляющую выработку, по пылевому и газовому факторам в этом случае с учетом выражения (6.5) можно привести к виду

$$Q_{\text{к(по пыли)}} = \frac{Q + Q_{\text{ш}}}{\{n_0^*/n_d - [t(Q + Q_{\text{ш}}) \exp(-\omega S_{\text{н}} t / V_{\text{к}})] / V_{\text{к}}\}}; \quad (6.26)$$

$$Q_{\text{к(по газу)}} = \frac{Q + Q_{\text{ш}}}{\{n_0^*/n_d - [t(Q + Q_{\text{ш}})] / V_{\text{к}}\}}. \quad (6.27)$$

Предположим, что все вредные примеси, образующиеся при взрыве заряда ВВ, переводятся в аккумуляющую выработку. В этом случае отношение начальной концентрации пыли в аккумуляющей выработке к предельно допустимой с учетом соотношения (1.6) может быть найдено из выражения

$$n_0^*/n_d = 10^3 C \sqrt[3]{A^2 f} / (V_{\text{к}} n_d), \quad (6.28)$$

где A — величина наружного заряда ВВ, кг; C — коэффициент, зависящий от свойств ВВ, $\text{г}^1/\text{г}^3$.

Отношение начальной концентрации ядовитых газов в аккумуляющей выработке к предельно допустимой концентрации их рассчитывают по формуле

$$n_0^*/n_d = 100Ab / (V_{\text{к}} n_d), \quad (6.29)$$

где b — выделение газа при взрыве ВВ, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Значение коэффициента C в формуле (6.28) в зависимости от работоспособности ВВ изменяется от 5,3 до 12,4 $\text{г}^1/\text{г}^3$ (см. п. 1.3). Причем большие его значения соответствуют ВВ с меньшей работоспособностью. Значения предельно допустимой концентрации пыли изменяется от 1 до 10 $\text{мг}/\text{м}^3$. Величина наружного заряда ВВ при дроблении негабаритов и ликвидации завес в рудовыпускных воронках колеблется от 2 до 10 кг. Подставив крайние значения C , A и n_d в формулу (6.28), найдем, что величина отношения начальной концентрации пыли в аккумуляющей выработке к предельно допустимой концентрации n_0^*/n_d при взрывании по породам с коэффициентом крепости $f = 8 \div 16$ изменяется от $4 \cdot 10^3 / V_{\text{к}}$ до $63,5 \cdot 10^3 / V_{\text{к}}$.

Значение b в зависимости от вида ВВ, способа взрывания, свойств взрывааемых пород и других факторов изменяется от 0,04 до 0,1 $\text{м}^3/\text{кг}$. Предельно допустимая концентрация ядови-

тых газов в пересчете на условную окись углерода равна 0,0016 %. Подставив крайние значения b и n_d в формулу (6.29), определим, что величина отношения средней концентрации ядовитых газов в аккумулирующей выработке к предельно допустимой концентрации их при взрывах в блоке 1 зарядов от 2 до 10 кг может изменяться от $5 \cdot 10^3/V_k$ до $62,5 \cdot 10^3/V_k$.

Таким образом, величина отношения n_0^1/n_d для пыли и ядовитых газов примерно одинаковая. Поскольку $\exp(-wS_{\text{пт}}t/V_k) < 1$, величина Q_k , определенная по газовому фактору, будет всегда больше значения Q_k , рассчитанного по пылевому фактору. Отсюда следует, что определяющим фактором при расчете последовательного проветривания очистных блоков после взрывных работ с временным аккумулированием вредных примесей является газовый.

Количество воздуха проходящего через аккумулирующую выработку, должно изменяться во время регулируемого выпуска в соответствии с уравнением (6.27). Концентрация ядовитых газов и пыли в воздухе, поступающем для проветривания второго забоя, в этом случае не превышает установленных норм.

Если регулирование расхода воздуха через камеру аккумулирующую выработку производить в соответствии с уравнением (6.26), концентрация ядовитых газов в воздухе, поступающем во второй забой, может превышать санитарные нормы.

6.4. Определение предельной величины заряда ВВ для проветривания без регулирования воздухораспределения

Изменение концентрации ядовитых газов в выработках горизонта выпуска руды после взрыва заряда ВВ описывается уравнением (4.6).

Пусть интенсивность перемешивания загрязненного воздуха в аккумулирующей выработке вентилятором-турбулизатором такова, что сразу же после начала поступления вредных примесей начинается их вынос из нее. С учетом выражений (4.6) и (6.3) выведено следующее дифференциальное уравнение, описывающее изменение концентрации вредных газов в аккумулирующей камере 2 после взрыва заряда ВВ в блоке 1 (см. рис. 6.1), когда весь воздух исходящий из него, направляется на вышележащий горизонт через камеру 2

$$dn^*/dt = Q [k_{\text{д}} n_0 \exp(-k_{\text{д}} Q t / V) - \frac{k_{\text{д}} Q n^* t}{V}], \quad (6.30)$$

где n^* — концентрация ядовитых газов в аккумулирующей камере в любой момент времени t , %; t — время, прошедшее с начала проветривания, с; $k_{\text{д}}$ — коэффициент полезного действия вентиляционной струи, проветривающей горизонт выпуска руды; n_0 — начальная концентрация ядовитых газов в выработках горизонта выпуска руды после взрыва заряда ВВ, %; V — объем выработок горизонта выпуска, загрязняемый продуктами взрыва, м³.

Решая уравнение (6.30) относительно n^k , получим

$$n^k = n_0 \exp(-k_n^k Q t / V_k) \left\{ n_0^k / n_0 + \frac{k_n}{k_n^k (r-1)} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \exp\left(-\frac{r-1}{V_k} k_n^k Q t\right) \right] \right\} + n', \quad (6.31)$$

где n_0^k — концентрация ядовитых газов в аккумулирующей камере перед взрыванием, %; r — коэффициент, характеризующий кратность разбавления вредных примесей в аккумулирующей камере,

$$r = V_k k_n / V k_n^k. \quad (6.32)$$

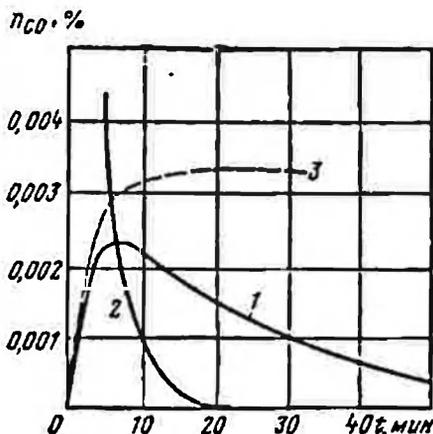


Рис. 6.3. График зависимости концентрации n_{CO} в аккумулирующей камере в очистной выработке от времени t при проветривании без регулирования воздухораспределения

На рис. 6.3 приведены построенные по уравнениям (6.31) и (4.6) графики изменения во времени концентрации ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода в аккумулирующей выработке объемом $V_k = 3000 \text{ м}^3$ (кривая 1) и очистной выработке блока 1 объемом $V = 300 \text{ м}^3$ (кривая 2) после взрыва в ней заряда ВВ величиной $A = 2,5 \text{ кг}$ при расходе воздуха на проветривание $Q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$. Кривая 3 показывает, как изменялась бы средняя концентрация ядовитых газов в аккумулирующей выработке, если бы они не выносились из нее. Из приведенных графиков видно, что концентрация вредных примесей в аккумулирующей выработке начинает снижаться значительно раньше, чем заканчивается проветривание выработки, в которой произведено взрывание.

Взяв первую производную функцию $n^k = f(t)$ и приравняв ее нулю, найдем время, по истечении которого начинается снижение концентрации ядовитых газов в аккумулирующей выработке.

$$t = V_k \cdot \ln \left[r / \left[1 + n_0^k k_n^k (r-1) / n_0 k_n \right] / [k_n^k Q (r-1)] \right]. \quad (6.33)$$

Подставив полученное значение t в уравнение (6.31), получим выражение для определения максимальной концентрации ядовитых газов в аккумулирующей выработке

$$n_{\max}^k = n_0 k_n \left[1/r + n_0^k k_n^k (r-1) / (n_0 k_n r) \right]^{r/(r-1)} / k_n^k. \quad (6.34)$$

В полученное выражение входит концентрация ядовитых газов в аккумулирующей выработке перед взрыванием n_0^k . В том случае, если в течение смены взрывание производится несколько раз, значение n_0^k от взрыва к взрыву будет увеличиваться.

Пусть в течение смены производится i взрывов с интервалом времени между ними t_n . Перед вторым взрывом концентрация ядовитых газов, оставшихся в аккумулирующей выработке от первого взрыва, в соответствии с уравнением (6.31) будет

$$n_{02}^k = n_0 C D, \quad (6.35)$$

где

$$C = \exp(-k_n^k Q t_n / V_n); \quad (6.36)$$

$$D = k_n \{1 - C^{r-1}\} / k_n^k (r-1). \quad (6.37)$$

Перед третьим взрывом она увеличивается и будет равна

$$n_{03}^k = n_0 (C + C^2) D, \quad (6.38)$$

перед четвертым

$$n_{04}^k = n_0 (C + C^2 + C^3) D. \quad (6.39)$$

По аналогии с (6.35), (6.38) и (6.39) концентрацию ядовитых газов, оставшихся от предыдущих взрывов в аккумулирующей выработке, перед последним взрывом

$$n_{0i}^k = n_0 (C + C^2 + \dots + C^{i-1}) D. \quad (6.40)$$

Выражение (6.40) можно привести к виду

$$n_{0i}^k = n_0 D (C - C^i) / (1 - C). \quad (6.41)$$

Подставив полученное значение n_{0i}^k в уравнение (6.34) вместо n_0^k , найдем максимальную концентрацию ядовитых газов в аккумулирующей выработке.

$$n_{\text{max}}^k = n_0 \frac{k_n}{k_n^k} \left\{ \frac{1}{r} \left[1 + \frac{(1 - C^{r-1})(C - C^i)}{1 - C} \right] \right\}^{r/(r-1)} \quad (6.42)$$

Начальная концентрация ядовитых газов в проветриваемой выработке после взрыва заряда ВВ

$$n_0 = 100 A b / V, \quad (6.43)$$

Для того чтобы воздух, выходящий из аккумулирующей выработки, после подсвеживания мог быть использован для проветривания следующего забоя, максимальная концентрация ядовитых газов в аккумулирующей выработке в соответствии с условием (6.4) не должна превышать значение, определяемое из выражения

$$n^k = F_n / k_n^k Q + n', \quad (6.44)$$

где F_d — допустимая интенсивность выпуска вредных примесей, образованных при взрыве заряда ВВ, на вышележащий горизонт, определяемая по формуле (6.5).

Подставив в уравнение (6.42) вместо l_0 его значение из (6.43) и приравняв полученное выражение значению l^k из выражения (6.44), можно найти предельную величину заряда ВВ, при которой отпадает необходимость регулирования выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки при последовательном проветривании

$$A_{пр} = \frac{F_d V}{100 b k_n Q} \left\{ \frac{r}{1 + [(1 - c^{-1})(c - c^r)] / (1 - c)} \right\}^{r / (r - 1)} \quad (6.45)$$

Объем выработок горизонтов скреперования, загрязняемый при взрывании наружных зарядов ВВ пылью и газами, составляет обычно 300—400 м³. Количество воздуха, подаваемого для их проветривания, исходя из условия обеспечения минимально допустимой скорости вентиляционной струи, составляет 2—3 м³/с. Значение k_n согласно исследованиям равно 0,9. Значение k_n^k можно принять равным 1, так как в аккумулирующей выработке в течение всего времени проветривания производится перемешивание загрязненного воздуха вентилятором-турбулизатором.

Расчеты, выполненные по формуле (6.45) при $Q=2$ м³/с, $Q_{ш}=1$ м³/с, $V=300$ м³ и $b=0,04$ м³/кг, дают следующие значения предельной величины заряда ВВ $A_{пр}$, позволяющей вести взрывные работы без регулирования воздухораспределения, в зависимости от объема аккумулирующей выработки V_k и числа взрываний l в течение смены:

$V_k, \text{ м}^3$	1000	3000	5000	10 000	15 000	20 000
$A_{пр}, \text{ кг при:}$						
$l=1$	1,0	2,4	3,6	6,7	9,8	12,9
$l=3$	1,0	2,3	3,4	5,1	6,4	7,4
$l=6$	1,0	2,1	2,7	3,4	3,9	4,4

При расчетах продолжительность смены принята 6 ч, взрывание производится через равные промежутки времени.

Во многих случаях проветривание с временным аккумулированием вредных примесей возможно без регулирования количества воздуха, поступающего через аккумулирующую выработку.

6.5. Расчет проветривания

При величине взрываемого заряда ВВ, превышающей предельное значение, определяемое из выражения (6.45), производится регулирование выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки на вышележащий горизонт путем изменения расхода воздуха, поступающего через нее и восстающий.

Проветривание забоя после взрывных работ с временным аккумулированием вредных примесей можно разбить на четыре этапа. На первом этапе производится перепуск вредных примесей из

проветриваемого забоя в аккумулирующую выработку; на втором — перемешивание их в аккумулирующей выработке с целью усреднения концентрации; на третьем этапе производится регулируемый выпуск вредных примесей из нее в исходящую струю; на четвертом — проветривание аккумулирующей выработки при полном расходе воздуха. При перепуске вредных примесей весь воздух из проветриваемого забоя должен направляться на вышележащий горизонт через аккумулирующую выработку. Чтобы исключить при этом возможность появления опасных концентраций в исходящей струе время движения вредных примесей по аккумулирующей выработке должно быть не менее времени перепуска. Для этого длина выработки L_k должна отвечать условию

$$L_k > Q t_1 / S_k, \quad (6.46)$$

где S_k — площадь поперечного сечения аккумулирующей выработки, m^2 ; t_1 — время перепуска вредных примесей в аккумулирующую выработку, с.

Вентилятор-турбулизатор на время перепуска вредных примесей выключается.

Перепуск вредных примесей продолжается до тех пор, пока концентрация их в проветриваемой выработке не снизится до величины

$$n_1 = F_d / k_n Q. \quad (6.47)$$

Время перепуска

$$t_1 = \frac{\bar{v}}{k_n Q} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (6.48)$$

Подставив вместо n_0 начальную концентрацию ядовитых газов в проветриваемой выработке, выраженную через ее объем и величину взрываемого заряда ВВ, а вместо n_1 ее значение из (6.47), выражение (6.48) можно выразить в виде уравнения

$$t_x = \frac{V}{k_n Q} \ln \frac{100Ab/V - n'}{[F_d/k_n Q - n']}. \quad (6.49)$$

Время t_x проветривания при закрытом регуляторе P_k и открытом регуляторе P_b должно быть достаточным для усреднения концентрации вредных примесей в аккумулирующей выработке и полного проветривания выработки, в которой проведен взрыв заряда ВВ.

На основании результатов наблюдений за изменением концентрации окиси углерода в изолированной камере объемом $5000 m^3$ после взрывания наружных зарядов ВВ при перемешивании в ней воздуха вентилятором-турбулизатором с производительностью $5,2 m^3/c$ (см. рис. 6.4) установлено, что с достаточной для практических расчетов точностью можно принимать

$$t_2 = 0,75V_k / Q_t, \quad (6.50)$$

где Q_t — производительность вентилятора-турбулизатора, m^3/c .

Для полного освобождения от вредных примесей сквозной выработки, в которой производилось взрывание, достаточно осуществить в ней 4—5-кратный обмен воздуха.

В связи с этим значение t_2 , рассчитанное по формуле (6.50), должно отвечать условию

$$t_2 > 5V/Q - t_1. \quad (6.51)$$

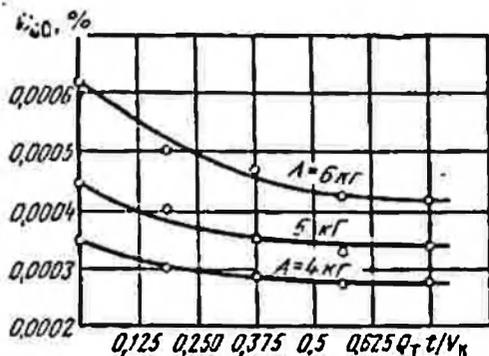


Рис. 6.4. График изменения концентрации $n_{с0}$ в зоне отброса газов и пыли после взрыва наружного заряда ВВ в изолированной камере от комплексного параметра $Q_T t / V_K$

Объем выработки, загрязняемый вредными примесями при взрывании наружных зарядов ВВ на горизонтах выпуска, как уже отмечалось выше, обычно не превышает 300—400 м³. Объем аккумулялирующих камер исчисляется тысячами кубических метров. Поэтому условие (6.51) не является определяющим при расчете t_2 .

По истечении времени t_2 приступают к выпуску вредных примесей из аккумулялирующей выработки.

При ступенчатом регулировании регуляторы P_K и P_B в начале выпуска вредных примесей ставятся в положение, при котором расходы воздуха, проходящего через аккумулялирующую выработку и восстающий, равны значениям, определяемым соответственно по уравнениям (6.14) и (6.16). Затем, когда концентрация вредных примесей в аккумулялирующей выработке уменьшится до величины, определяемой из выражения (6.43), регуляторы приводятся в нормальное положение и весь воздух вновь направляется через нее.

Время регулируемого выпуска вредных примесей, в течение которого воздух поступает на вышележащий горизонт через аккумулялирующую выработку и восстающий, определяют из выражения

$$t_p = \frac{V_K}{k_n^k Q_n} \ln \frac{n_0^k - n'}{F_n / k_n^k Q - n'}. \quad (6.52)$$

Полагая, что содержание вредных примесей в аккумулялирующей камере от предыдущего взрывания в начале регулируемого выпуска составляет n_n , значение n_0^k при расчете Q_n и t_p определяют по формуле

$$n_0^k = V_K (100Ab/V - F_n / k_n^k Q) / \tilde{V} + n_n. \quad (6.53)$$

По истечении времени t_p аккумулярующая выработка проветривается при расходе воздуха $Q_k = Q$. Для снижения концентрации вредных примесей в ней до допустимого уровня потребуется время

$$t_3 = \frac{V_k}{k_d Q} \ln \frac{F - 1/n^k Q - n'}{n_d - n'} \quad (6.54)$$

Время t_3 включает в себя и время перепуска вредных примесей в аккумулярующую выработку.

Интервал времени между двумя взрывами должен быть не менее

$$t_n = t_2 + t_p + t_3 \quad (6.55)$$

При плавном регулировании выпуска вредных примесей на вышележащий горизонт расходы воздуха через аккумулярующую выработку и восстающий в начале выпуска должны быть установлены в соответствии с зависимостями (6.14) и (6.16).

Затем расход воздуха через аккумулярующую выработку постепенно увеличивается до Q , а расход воздуха, проходящего по восстающему, уменьшается до 0.

Изменение количества воздуха, проходящего через аккумулярующую камеру, должно производиться в соответствии с уравнением (6.20).

Время регулируемого выпуска вредных примесей из аккумулярующей камеры определяется по формуле

$$t_p = \frac{V_k}{k_d Q} \left(\frac{F - 1/n^k Q}{n_d - n'} - 1 \right) \quad (6.56)$$

Значение n_0^k при расчете расходов воздуха и времени регулируемого выпуска находится, как и при ступенчатом регулировании выпуска, по формуле (6.53). Подставив полученное значение t_p вместо t в уравнении (6.19), найдем, что концентрация вредных примесей в аккумулярующей камере к концу регулируемого выпуска снижается до значения, определяемого из выражения (6.44).

По окончании регулируемого выпуска вредных примесей начинается проветривание аккумулярующей выработки при постоянном расходе воздуха $Q_k = Q$, продолжающемся вплоть до взрыва следующего заряда ВВ. За это время содержание вредных примесей в аккумулярующей выработке должно быть снижено до ПДК. Продолжительность проветривания аккумулярующей камеры при полном расходе воздуха должна быть не менее t_3 , определяемой из выражения (6.54), а интервал времени между двумя взрывами — не менее t_n , определяемого из выражения (6.55).

Эксперименты, выполненные на шахте № 1 Березовского рудника им. С. М. Кирова, показали высокую эффективность проветривания очистных забоев после взрывных работ с временным аккумулярованием вредных примесей и справедливость теоретических положений, изложенных выше. Наблюдения за изменением средней концентрации окиси углерода в аккумулярующей камере

объемом 5000 м^3 во время регулируемого выпуска вредных примесей из нее производились после взрывания наружных зарядов ВВ величиной 4, 5 и 6 кг (рис. 6.5). Регулирование количества воздуха, проходящего через камеру, производили в соответствии с уравнением (6.20). Общий расход воздуха на проветривание составлял $1,9 \text{ м}^3/\text{с}$, количество воздуха, подаваемого для подсвеживания исхо-

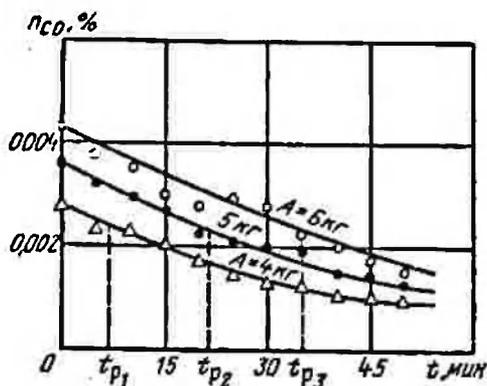


Рис. 6.5. Расчетные кривые и результаты наблюдений за изменением концентрации пыли $\eta_{со}$ в аккумулярующей камере во время регулируемого выпуска вредных примесей

дящей струи, $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Символами $t_{р1}, t_{р2}$ и $t_{р3}$ обозначено время окончания регулирования расходов воздуха, проходящего через камеру и обводную выработку, соответственно при проветривании после взрыва 4, 5 и 6 кг ВВ. Экспериментальные точки во всех случаях удовлетворительно расположились около расчетных кривых, построенных для регулируемого выпуска по уравнению (6.19), для нерегулируемого выпуска — по уравнению (6.21). Анализ проб воздуха, отобранных в исходящей из камеры струе после смешивания ее с подсвежающей струей, показал, что содержание вредных примесей (окиси углерода, окислов азота и пыли) в течение всего времени проветривания не превышало ПДК. При тех же зарядах ВВ была проведена серия контрольных экспериментов, при которых проветривание аккумулярующей камеры сразу начиналось при полном расходе воздуха, минуя этап регулируемого выпуска вредных примесей. Содержание окиси углерода и окислов азота в исходящей струе при контрольных экспериментах в начале проветривания значительно превышало ПДК.

Пример. Рассчитать режим проветривания очистного забоя, представляющего сквозную выработку длиной $L=100 \text{ м}$ с площадью поперечного сечения $S=4 \text{ м}^2$, после взрывания наружных зарядов ВВ величиной $A=4 \text{ кг}$. Для временного аккумулярования вредных примесей может быть использована отработанная камера с площадью поперечного сечения $S_k=30 \text{ м}^2$, длиной $L_k=100 \text{ м}$. Проветривание очистного забоя осуществляется свежим воздухом, не содержащим вредных примесей, в количестве $Q=2,5 \text{ м}^3/\text{с}$, для подсвеживания исходящей струи по вышележащему горизонту подается $Q_{ш}=1 \text{ м}^3/\text{с}$ чистого воздуха, $k_{ш}=-0,9$; $k_{ш}^k=1,0$.

Решение. 1. По формуле (1.9) определяем длину зоны отброса газов и пыли при взрыве заряда ВВ, предварительно подобрав значения коэффициентов K и B по табл. 1.1,

$$l_{з.о} = 5 \cdot 4 + 55 = 76 \text{ м.}$$

2. Определяем объем очистной выработки V , загрязняемый при взрыве заряда ВВ, объем аккумулирующей камеры V_k и по формуле (6.32) рассчитываем значение коэффициента r , характеризующего кратность разбавления вредных примесей в аккумулирующей камере.

$$V = 4.76 = 304 \text{ м}^3; \quad V_k = 30 \cdot 100 = 3000 \text{ м}^3; \quad r = 3000 \cdot 0,9 / 304 \cdot 1 = 8,88.$$

3. Определяем максимально допустимую интенсивность выноса вредных примесей (ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода) из проветриваемого забоя в исходящую струю по формуле (6.5)

$$F_d = 2,5 (0,0016 - 0) + 1(0,0016 - 0) = 0,0056.$$

4. Из выражения (6.45) находим максимальную величину заряда, позволяющую осуществлять проветривание без регулирования выпуска вредных примесей. Для упрощения расчет вначале производим при $i=1$.

$$A_{\text{max}} = (0,0056 \cdot 304) : (100 \cdot 0,04 \cdot 0,9 \cdot 2,5) [8,88 : (1 + 0)]^{\frac{8,88}{8,88-1}} = 2,2 \text{ кг} < 4 \text{ кг}.$$

Проветривание должно осуществляться с регулированием выпуска вредных примесей из аккумулирующей камеры.

5. По формуле (6.49) находим время перепуска вредных примесей из проветриваемой выработки в аккумулирующую камеру

$$t_1 = 300 : (0,9 \cdot 2,5) \ln [(100 \cdot 4 \cdot 0,04 : 300 - 0) : (0,0056 : 0,9 \cdot 2,5 - 0)] = \\ = 400 \text{ с} = 6,7 \text{ мин}.$$

Принимаем: $t_1 = 7$ мин.

6. Проверяем условие (6.46)

$$Qt_1/S_k = 2,5 \cdot 60 \cdot 7 : 30 = 35 \text{ м}; \quad L_k = 100 \text{ м} > 35 \text{ м}.$$

7. По формуле (6.50) определяем время, в течение которого должно производиться перемешивание воздуха в аккумулирующей камере при закрытом регуляторе P_k и открытом P_a

$$t_2 = 0,75 \cdot 3000 : 6 = 375 \text{ с} = 6,25 \text{ мин}.$$

Принимаем $t_2 = 7$ мин.

8. Проверяем условие (6.51)

$$5V/Q - t_1 = 5 \cdot 300 : 2,5 \cdot 60 - 7 = 3 \text{ мин}; \quad t_2 = 7 \text{ мин} > 3 \text{ мин}.$$

9. Определяем среднюю концентрацию ядовитых газов в аккумулирующей камере в начале выпуска по формуле (6.53)

$$n_0^k = 1 : 9,9 (100 \cdot 4 \cdot 0,04 : 300 - 0,0056 : 0,9 \cdot 2,5) + 0,0016 = 0,0068 \text{ \%}.$$

10. Выбираем ступенчатый способ регулирования выпуска вредных примесей из аккумулирующей камеры и определяем расходы воздуха, которые должны проходить через аккумулирующую камеру Q_k и восстающий (обводную выработку) Q_a на первой ступени выпуска. Значение Q_k рассчитываем по формуле (6.14)

$$Q_k = 0,0056 : 1 : 0,0068 = 0,8 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_a = Q - Q_k = 2,5 - 0,8 = 1,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

11. По формуле (6.52) находим время регулируемого выпуска при ступенчатом регулировании его

$$t_p = 3000 : 1 : 0,8 \cdot \ln (0,0068 - 0) / (0,0056 : 1 : 2,5 - 0) = 4100 \text{ с} = 69 \text{ мин}.$$

12. По формуле (6.54) определяем время, которое дополнительно потребуется для снижения концентрации вредных примесей в аккумулирующей камере до ПДК при $Q_k=Q$

$$t_3 = 3000 : 1 : 2,5 \ln (0,0056 / 1 \cdot 2,5 - 0) : (0,0016 - 0) = 404 \text{ с} \approx 7 \text{ мин}.$$

13. Находим минимальный интервал времени между взрывами

$$t_{\text{н}} = t_1 + t_p + t_2 = 7 + 69 + 7 = 83 \text{ мин.}$$

Если выбран способ плавного регулирования выпуска вредных примесей из аккумулирующей камеры, то расходы воздуха $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{в}}$ принимаются в качестве исходных при регулировании выпуска, а дальнейший расчет производим в следующей последовательности.

11. Определяем закон регулирования расходов воздуха $Q_{\text{н}}$ и $Q_{\text{в}}$. Закон регулирования расходов воздуха $Q_{\text{н}}$ определяем по уравнению (6.20)

$$Q_{\text{н}} = 3000 : (0,0068 \cdot 3000 / 0,0056 - t) = 3000 : (3650 - t);$$

$$Q_{\text{в}} = Q - Q_{\text{н}} = 2,5 - 3000 : (3650 - t).$$

12. По уравнению (6.56) находим время регулируемого выпуска вредных примесей из аккумулирующей камеры

$$t_p = 3000 (0,0068 : 0,0056 - 1 : 1 : 2,5) = 2460 \text{ с} = 41 \text{ мин.}$$

13. Время снижения концентрации вредных примесей до ПДК t_2 будет таким же, как при ступенчатом регулировании выпуска, т. е. $t_2 = t$ мин.

14. Определяем минимальный интервал времени между взрывами

$$t_{\text{н}} = t_1 + t_p + t_2 = 7 + 41 + 7 = 55 \text{ мин.}$$

Большое значение при проветривании с временным аккумулярованием вредных примесей имеет правильный выбор регуляторов воздухораспределения.

Наиболее просто распределение воздуха между аккумулирующей и обводной выработками осуществляется при варианте проветривания со ступенчатым регулированием выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки. В качестве одного из регуляторов воздухораспределения в этом случае может быть использована вентиляционная дверь с нерегулируемым окном, в качестве другого — вентиляционная дверь без окна. Первый регулятор может находиться в трех положениях: дверь открыта полностью; дверь и окно закрыты; дверь закрыта, окно открыто. При использовании вентиляционной двери с окном в качестве регулятора $P_{\text{н}}$ нормальным положением, т. е. положением при обычном проветривании, является первое; при использовании в качестве регулятора $P_{\text{в}}$ — второе положение.

Второй регулятор может быть либо полностью закрыт (нормальное положение $P_{\text{в}}$), либо полностью открыт (нормальное положение $P_{\text{н}}$).

Управление процессом проветривания после взрыва заряда ВВ сводится к следующему. По истечении времени t_1 после взрыва регулятор $P_{\text{н}}$ закрывается, а регулятор $P_{\text{в}}$ открывается; включается вентилятор-турбулизатор в аккумулирующей выработке. Весь воздух из проветриваемого забоя уходит при этом через регулятор $P_{\text{в}}$. В таком положении регуляторы находятся в течение времени t_2 . Затем воздух, исходящий из проветриваемого забоя, делится на две части. Одна часть $Q_{\text{н}}$ идет через аккумулирующую выработку, другая часть $Q_{\text{в}}$ — через восстающий (обводную выработку). Для этого вентиляционная дверь с окном должна быть приведена в третье положение. Второй регулятор должен быть пол-

ностью открыт. По истечении времени t_p оба регулятора приводятся в нормальное положение.

Расчет регуляторов воздухораспределения при использовании ступенчатого способа регулирования выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки сводится к определению площадей проемов вентиляционных дверей и вентиляционного окна. Расчет производится по общепринятой методике [21, 22]. При этом следует иметь в виду, что на любом этапе проветривания через проветриваемый забой должно поступать расчетное количество воздуха. Сопротивления параллельных ветвей, по которым уходит воздух из забоя, при полностью открытых регуляторах должны быть одинаковые.

При варианте проветривания с плавным регулированием выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки в качестве обоих регуляторов должны использоваться вентиляционные переключки с регулируемыми окнами, позволяющими плавно изменять расходы воздуха, поступающего через них, от 0 до Q . При обычных режимах проветривания регулятор P_k должен быть открыт, а регулятор P_b — закрыт. Управление процессом проветривания после взрыва заряда ВВ производится так же, как при варианте проветривания со ступенчатым регулированием выпуска вредных примесей, за исключением самого этапа выпуска. В течение времени t_p (при данном варианте проветривания) сопротивление регулятора P_k должно постепенно уменьшаться при соответствующем увеличении сопротивления регулятора P_b . Изменение сопротивления регуляторов определяется законом изменения расходов воздуха Q_k и Q_b во время регулируемого выпуска и производится путем изменения площади вентиляционных окон в них.

Выведем закон, по которому должна изменяться площадь поперечного сечения вентиляционных окон во время регулируемого выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки. Участок вентиляционной сети от места разделения исходящей из проветриваемого забоя струи на две струи до места слияния их на вышележащем горизонте (см. рис. 6.1) может быть представлен в виде параллельного соединения, состоящего из двух ветвей, на одной из которых установлен регулятор P_k , на другой — P_b .

В связи с тем, что суммарное количество воздуха на любом этапе проветривания должно быть равным Q , а депрессия h , за счет которой происходит движение воздуха, постоянна, на любом этапе проветривания общее аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка вентиляционной сети должно быть постоянным, т. е.

$$R_{об} = h/Q^2 = \text{const.} \quad (6.57)$$

Сопротивление каждой ветви параллельного соединения может быть выражено через количество воздуха, проходящего по ней, и общую депрессию h

$$R_1 = h/Q_k^2; \quad (6.58)$$

$$R_2 = h/Q_b^2. \quad (6.59)$$

где \bar{R}_1 — сопротивление ветви с регулятором P_K , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$; R_2 — сопротивление ветви с регулятором P_B , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$.

Сопротивления R_1 и R_2 складываются из сопротивлений выработок и регуляторов. Сопротивления выработок ввиду их небольшой протяженности малы по сравнению с сопротивлением регуляторов и ими можно пренебречь. Тогда выражения (6,58) и (6,59) примут вид

$$R_K = h/Q_K^2; \quad (6.60)$$

$$R_B = h/Q_B^2, \quad (6.61)$$

где \bar{R}_K — сопротивление регулятора P_K , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$; R_B — сопротивление регулятора P_B , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$.

Условие (6.57) должно выдерживаться не только во время регулируемого выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки, но и при нормальных режимах проветривания, когда окно регулятора P_K полностью открыто, а регулятор P_B закрыт, а также во время перемешивания вредных примесей в аккумулирующей выработке, когда полностью открыто окно регулятора P_B , а регулятор P_K закрыт. Для этого необходимо, чтобы сопротивление полностью открытого окна каждого регулятора было равным $R_{об}$, т. е.

$$R_{ок}^K = R_{ок}^B = R_{об} = h/Q^2, \quad (6.62)$$

где $R_{ок}^K$ — сопротивление полностью открытого окна регулятора P_K , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$; $R_{ок}^B$ — сопротивление полностью открытого окна регулятора P_B , $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{M}^6$.

С учетом (6.62) выражения (6.60) и (6.61) можно записать в виде

$$R_K = R_{ок}^K (Q/Q_K)^2; \quad (6.63)$$

$$R_B = R_{ок}^B (Q/Q_B)^2 \quad (6.64)$$

Подставив вместо \bar{Q}_K и \bar{Q}_B их значения из выражений (6.20) и (6.2), получим уравнения, в соответствии с которыми должны изменяться сопротивления регуляторов P_K и P_B во время регулируемого выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки

$$R_K = R_{ок}^K (k_n^K Q/V_K)^2 (n_0^K V_K/F_d - t)^2; \quad (6.65)$$

$$R_B = R_{ок}^B / \left[1 - \frac{V_K}{k_n^K Q (n_0^K V_K/F_d - t)} \right]^2. \quad (6.66)$$

Изменение величины аэродинамического сопротивления регуляторов производится за счет изменения площади их окон. Между площадью окна регулятора и его сопротивлением существует зависимость

$$S_D = S_B / (a + b S_B \sqrt{R_D}), \quad (6.67)$$

где S_p — площадь окна регулятора, m^2 ; S_b — площадь поперечного сечения выработки в месте установки регулятора, m^2 ; a и b — постоянные.

При $S_p/S_b < 0,5$ $a=0,65$; $b=0,84$; при $S_p/S_b > 0,5$ $a=1$; $b=0,76$.

С учетом зависимостей (6.65) — (6.67) получены уравнения, описывающие закон изменения площади окон регуляторов P_K и P_B во время выпуска вредных примесей из аккумулирующей выработки,

$$S_{pK} = S_b^k / [k_n^k Q (n_0^k V_n / F_n - t) (\bar{S}_b^k / \bar{S}_{ок}^k - a) / V_n + a]; \quad (6.68)$$

$$S_{pB} = S_b^b / [1 - V_n / k_n^b Q (n_0^b V_n / F_n - t) (\bar{S}_b^b / S_{ок}^b - a) + a], \quad (6.69)$$

где S_{pK} и S_{pB} — соответственно площади регуляторов P_K и P_B в момент времени t , m^2 ; \bar{S}_b^k и \bar{S}_b^b — соответственно площади поперечного сечения выработок в местах установки регуляторов P_K и P_B , m^2 ; $S_{ок}^k$ и $S_{ок}^b$ — соответственно площади окон регуляторов P_K и P_B в полностью открытом положении, m^2 ; t — время, прошедшее с начала регулируемого выпуска, с.

В начале регулируемого выпуска ($t=0$)

$$S_{pK(t=0)} = S_b^k / [k_n^k Q n_0^k (S_b^k / S_{ок}^k - a) / F_n + a]; \quad (6.70)$$

$$S_{pB(t=0)} = S_b^b / [1 - F_n / (k_n^b Q n_0^b) (\bar{S}_b^b / S_{ок}^b - a) + a]. \quad (6.71)$$

Подставив в выражения (6.68) и (6.69) значение t_p из (6.56), получим

$$S_{pK(t=t_p)} = S_{ок}^k; \quad (6.72)$$

$$S_{pB(t=t_p)} = \infty. \quad (6.73)$$

Площади полностью открытых окон регуляторов P_K и P_B определяют из выражения (6.67) с учетом (6.62)

$$S_{ок}^k = S_b^k / (a + b S_b^k \sqrt{h} / Q); \quad (6.74)$$

$$S_{ок}^b = S_b^b / (b + b S_b^b \sqrt{h} / Q). \quad (6.75)$$

Если регуляторы устанавливаются в выработках с одинаковой площадью поперечного сечения, то $S_{ок}^k = S_{ок}^b$.

7. ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕЕ ПРОВЕТРИВАНИЕ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК

7.1. Способы проветривания выработок при их проведении

Вентиляция является одним из основных средств борьбы с рудничной пылью при проведении горных выработок. Никакие мероприятия без правильно организованного проветривания не мо-

гут решить проблемы снижения запыленности воздуха до ПДК. Эффективность обеспыливающего проветривания проходческих забоев зависит главным образом от правильно выбранного способа проветривания и вентиляционного оборудования. Проветривание выработок при их проведении осуществляется в настоящее время в основном вентиляторами местного проветривания (ВМП). Проветривание за счет общешахтной депрессии применяется редко.

Существующие способы проветривания тупиковых выработок с помощью ВМП принято делить на нагнетательный, всасывающий и комбинированный способы. Каждый способ имеет свои достоинства, недостатки и оптимальную область применения.

Нагнетательный способ проветривания. При нагнетательном способе проветривания свежий воздух подается в призабойную часть выработки по трубопроводу, а загрязненный удаляется по самой выработке. Вентилятор располагается в выработке, по которой поступает сквозная струя. Для предотвращения засасывания вентилятором загрязненного воздуха, выходящего из проветриваемой выработки, его всас располагается не ближе 10 м от устья выработки со стороны поступления свежей струи. Вентиляционная струя, поступая из нагнетательного трубопровода с большой скоростью, интенсивно перемешивает и удаляет загрязненный воздух из призабойной части выработки. Распространение ее в призабойной части проветриваемой выработки происходит по законам свободной турбулентной струи первого рода. Дальнобойность струи зависит от места положения выходного отверстия трубопровода в выработке, его диаметра и степени турбулентности выходящего из трубопровода потока воздуха. В практических условиях она составляет 10—20 м.

Особенностью проветривания тупиковых выработок нагнетательным способом после взрывных работ является то, что по мере движения газопылевого облака по выработке происходит уменьшение концентрации вредных примесей в нем за счет неравномерного распределения скоростей движения воздуха в сечении выработки. В результате этого даже максимальная концентрация вредных примесей, имеющая место в начале проветривания, при достаточно большой длине выработки может снизиться до допустимого уровня еще до выхода их в основную выработку [21]. По данным В. Н. Воронина, для газов ВВ это расстояние составляет $450A/S$ (A — величина заряда ВВ, кг; S — площадь поперечного сечения выработки, m^2). Снижению концентрации вредных примесей в газопылевом облаке, движущемся к устью выработки, способствуют утечки воздуха из нагнетательного трубопровода. Концентрация пыли уменьшается также за счет осаждения ее на стенки, почву и кровлю выработки. Достоинство нагнетательного способа проветривания — наличие активной струи воздуха в призабойной части выработки и быстрое удаление вредных примесей из нее. Недостаток — удаление вредных примесей из призабойной части выработки происходит по самой выработке, за счет чего увеличивается время проветривания ее при взрывных работах.

Всасывающий способ проветривания. При всасывающем способе проветривания тупиковой выработки свежий воздух поступает в призабойную зону по выработке, загрязненный воздух удаляется по трубопроводу вентилятором, установленным в основной выработке на свежей струе. Поскольку вентилятор работает на всасывание, внутри трубопровода создается разрежение и часть свежего воздуха, поступающего по выработке к забою, засасывается в него через имеющиеся неплотности, не достигая призабойной зоны. При всасывающем проветривании, так же как и при нагнетательном, имеется три характерных участка движения воздуха: по выработке, в призабойной части и по трубопроводу. Закономерности движения воздуха по выработке и по трубопроводу при обоих способах проветривания одинаковые. Движение же воздуха в призабойной части при этих способах происходит по разным законам.

Если при нагнетании воздух из конца трубопровода выходит в виде свободной струи, то при всасывающем способе вокруг всасывающего конца создается скоростное поле (спектр всасывания). Форма его — грибовидная, почти шарообразная.

По мере удаления от всасывающего отверстия в сторону забоя скорость движения воздуха быстро снижается. На расстоянии, равном одному диаметру трубы, она составляет менее 7 % от скорости во всасывающем отверстии, на расстоянии двух диаметров перемещение воздуха в сторону всасывающего отверстия очень мало. В связи с этим трубопровод должен как можно ближе подводиться к забою. Расстояние от забоя до конца всасывающего отверстия трубопровода должно быть не более $0,5 \sqrt{S}$ (S — площадь поперечного сечения выработки, m^2). Однако на практике это расстояние обычно не выдерживается в связи с опасностью повреждения трубопровода во время взрывных работ.

К недостаткам всасывающего способа проветривания относится также необходимость установки жесткого трубопровода. Чтобы избежать этого, вентилятор устанавливают в забое. Однако частая перестановка его также затруднительна.

Достоинством всасывающего способа проветривания является то, что во время взрывных работ не происходит загрязнения выработки на всем ее протяжении, что имеет важное значение, особенно при проветривании протяженных выработок.

Комбинированный способ проветривания. Комбинированный способ проветривания тупиковых выработок представляет собой сочетание нагнетательного и всасывающего способов. При этом используются основные положительные качества нагнетательного и всасывающего способов: проветривание призабойной зоны осуществляется активной свободной турбулентной струей, удаление загрязненного воздуха из призабойной зоны в основную выработку производится по трубопроводу. Основным достоинством комбинированного способа проветривания является сокращение до минимума времени проветривания тупиковой выработки после взрыва заряда ВВ в забое.

При классическом варианте комбинированного способа проветривания нагнетательный и всасывающий вентиляторы располагаются па сквозной вентиляционной струе — первый в 10 м перед устьем, второй в 10 м за устьем тупиковой выработки, считая по ходу струи. Чтобы не происходило распространения загрязненного воздуха за пределы зоны отброса газов и пыли при взрыве, производительность нагнетательного вентилятора должна быть меньше производительности всасывающего вентилятора. Недостатком этого варианта является необходимость прокладки двух трубопроводов на всю длину выработки, причем один из них должен быть обязательно жестким.

При отсутствии жесткого трубопровода всасывающий вентилятор в негазовых шахтах может устанавливаться в проветриваемой выработке на расстоянии, равном длине зоны отброса газов и пыли при взрывных работах. Недостатком этого варианта является наличие вентилятора в призабойной зоне, загромаждающего сечение выработки и создающего лишний шум. Кроме того, удаление газов по трубопроводу нагнетанием вызывает загрязнение воздуха в выработке за счет утечек.

Чтобы не прокладывать два трубопровода на всю длину проветриваемой выработки, можно всасывающий вентилятор оставлять па сквозной струе, а нагнетательный устанавливать в самой выработке па расстоянии 50—70 м от забоя с коротким трубопроводом. Недостатком этого варианта является необходимость прокладки жесткого трубопровода к всасывающему вентилятору.

Общий недостаток рассмотренных вариантов комбинированного проветривания тупиковых выработок — необходимость установки двух вентиляторов с трубопроводами, что удорожает проветривание и загромаждает сечение выработок. При проведении выработок малого сечения такие схемы проветривания неприменимы.

7.2. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при взрывных работах

Эффективное проветривание тупикового забоя, как было выше указано, возможно при наличии в нем активной вентиляционной струи, которая может быть создана только при нагнетательном и комбинированном способах проветривания. Обеспечить эффективное проветривание призабойной части выработки при всасывающем проветривании затруднительно из-за невозможности близкого расположения к забою всасывающего отверстия трубопровода ввиду опасности разрушения его в момент взрыва. В связи с этим расчет количества воздуха рассматривается только применительно к нагнетательному и комбинированному способам проветривания.

Нагнетательный способ проветривания. При определении количества воздуха, необходимого для проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом, следует иметь в виду, что за время, отводимое для проветривания, содержание вредных приме-

сей должно быть снижено до ПДК не только в призабойной части, но и по всей длине выработки.

В. Н. Ворониным установлено, что при проветривании тупиковой выработки нагнетательным способом происходит нарастание концентрации вредных примесей по длине газовой волны в направлении от зоны смешения к устью выработки в соответствии с уравнением

$$n = 0,89n_0 l_1 L^2 S^3 / (\rho^2 Q^3 t^3) + n', \quad (7.1)$$

где n_0 — начальная концентрация вредных примесей в призабойной зоне, мг/м³; l_1 — длина зоны смешения, м; L — расстояние от зоны смешения до сечения, для которого рассчитывается запыленность, м; S — площадь поперечного сечения выработки, м²; Q — количество воздуха, поступающего в зону смешения по нагнетательному трубопроводу, м³/с; t — время проветривания, с; ρ — коэффициент потерь воздуха в нагнетательном трубопроводе на длине выработки L ; n' — содержание вредных примесей в воздухе, подаваемом для проветривания, мг/м³.

В главе 3 было показано, что при движении запыленного воздуха по выработке происходит уменьшение запыленности за счет осаждения пылевых частиц на почву, бока и кровлю выработки. Изменение запыленности воздуха по длине выработки за счет осаждения пыли описывается уравнением (3.18).

Распределение концентрации пыли по длине выработки, проветриваемой после взрыва ВВ путем нагнетания свежего воздуха в забой, с учетом зависимостей (7.1) и (3.18) при $n' = 0$ описывается уравнением

$$n = [0,89n_0 l_1 S^3 L^2 / (\rho^2 Q^3 t^3)] \exp \{-m_1 L \sqrt[4]{S/Q_3}\}, \quad (7.2)$$

где m_1 — размерный коэффициент, учитывающий свойства пыли и поверхности осаждения, (м/с)^{3/4}.

На рис. 7.1 показано распределение средней концентрации пыли по длине волны в выработке с площадью поперечного сечения $S = 10$ м² через 11 мин, после взрыва заряда величиной 10 кг при расходе воздуха на проветривание $Q = 3$ м³/с. Концентрация пыли по длине выработки вначале увеличивается, затем, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться.

Возьмем первую производную функции (7.2) по L , приравняем нулю и решим полученное уравнение относительно L при $\rho = 1$.

$$L' = \frac{2}{m_1} \sqrt[4]{S/Q_3}. \quad (7.3)$$

Величина L' , определяемая из выражения (7.3), представляет собой расстояние от зоны смешения до сечения выработки, в котором будет максимальная концентрация пыли. Подставив значение L из уравнения (7.3) в (7.2), получим выражение для определения максимальной концентрации пыли в выработке в любой момент времени t после начала проветривания

$$n_{\max} = 0,48 l_1 S^{2,75} n_0 / (\rho^2 Q^{1,75} m_1^{0,75} t^3). \quad (7.4)$$

Решив уравнение (7.4) относительно Q при $n_{\max} = n_d$ (n_d — предельно допустимая концентрация пыли), получим формулу для подсчета количества воздуха, необходимого для проветривания выработки при ее длине, превышающей величину, определяемую из выражения (7.3),

$$Q = \frac{0,61}{l^2} \sqrt[3]{\frac{l_1^2 S^3 n_d^2}{\rho^4 m_1^4 n_d^2}}. \quad (7.5)$$

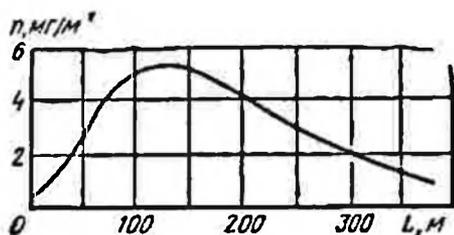


Рис. 7.1. График изменения концентрации пыли n по длине волны L в тупиковой выработке после взрыва заряда ВВ

Если длина выработки меньше величины, полученной из выражения (7.3), для проветривания потребуется меньший расход воздуха. Он может быть определен графическим решением уравнения (7.2) относительно Q при $n = n_d$. Для этого, задавшись рядом значений Q , определяют по уравнению (7.2) соответствующие значения n и строят график зависимости n от Q . Абсцисса точки пересечения построенной кривой с прямой уровня ПДК будет соответствовать искомому расходу воздуха.

Расчет количества воздуха, которое необходимо подавать в забой тупиковой выработки для проветривания ее после взрыва заряда ВВ по пылевому фактору, производят в следующей последовательности.

1. Определяют количество пыли N , образующейся при взрыве заряда ВВ. При взрывании шпуровых зарядов расчет производят по формуле (1.1). При взрывании наружных зарядов ВВ для определения N применяют формулу (1.6).

2. Рассчитывают длину выработки $l_{3.0}$, загрязняемую при взрыве заряда ВВ. При шпуровых зарядах она определяется по формуле (1.2). Для условий Криворожского бассейна и аналогичных условий расчет производят по формуле (1.3) или (1.4) в зависимости от способа взрывания. При взрывании наружных зарядов ВВ значение $l_{3.0}$ рассчитывают по формуле (1.9).

3. Определяют начальную концентрацию пыли по формуле (4.8).

4. Рассчитывают значение расхода воздуха по формуле (7.5).

5. По формуле (7.3) определяют расстояние от зоны смешения до сечения выработки, в котором должна быть максимальная запыленность.

6. Если длина выработки $L_n \geq \bar{L}$, к расчету принимается расход воздуха, определенный по формуле (7.5).

7. Если $L_n < L'$, задавшись несколькими значениями расхода воздуха, по формуле (7.2) рассчитывают соответствующие значения n , строят график зависимости n от Q . Абсцисса точки пересечения построенной кривой с прямой $n = n_n$ будет соответствовать искомому расходу воздуха.

Пример. Определить количество воздуха, которое необходимо подавать в забой тупиковой выработки для проветривания ее после взрыва шпурового заряда ВВ величиной 32 кг. Исходные данные для расчета: $S = 10 \text{ м}^2$; $L_n = 100 \text{ м}$; $I_n = 1,8 \text{ м}$; $\gamma = 2800 \text{ кг/м}^3$; $f = 12$; $n_d = 2 \text{ мг/м}^3$; $n' = 0$; $\rho = 1$; $t = 15 \text{ мин}$.

Решение:

$$N = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 32^3 \cdot 12 \sqrt{10} : 1,8 = 1036 \text{ г};$$

$$l_{a,0} = 2 \cdot 10^4 \cdot 32 : 2800 : 1,8 : \sqrt{10} = 40 \text{ м};$$

$$n_0 = 10^3 \cdot 1036 : 40 : 10 = 2590 \text{ мг/м}^3;$$

$$Q = 0,61 : (15 \cdot 60)^3 \sqrt[3]{10^3 \cdot 10^3 \cdot 2590^2 : 1 : 0,02^3 : 2^3} = 3,55 \text{ м}^3/\text{с};$$

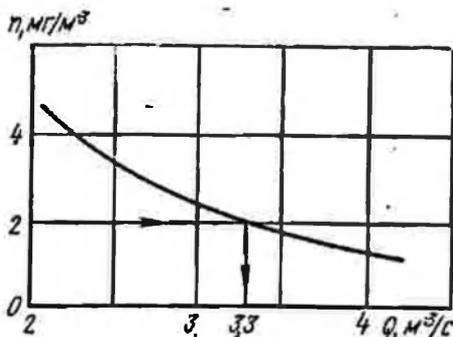
$$L_k = 2 : 0,02 : \sqrt[4]{10 : 3,55^3} = 146 \text{ м}.$$

Так как $L_n < 146 \text{ м}$, расход воздуха определяем графическим решением уравнения (7.2). Для этого задаемся несколькими значениями Q и по уравнению (7.2) определяем соответствующие значения n .

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	2	3	4
$n, \text{ мг/м}^3$	4,74	2,45	1,4

Строим график зависимости n от Q и находим абсциссу точки пересечения кривой с прямой $n = n_d$ (рис. 7.2). Она равна 3,3. Принимаем $Q = 3,3 \text{ м}^3/\text{с}$.

Рис. 7.2. График к решению задачи по определению расхода воздуха, необходимого для проветривания тупиковой выработки по пылевому фактору



Комбинированный способ проветривания. При комбинированном способе проветривания количество воздуха, которое должно подаваться нагнетательным вентилятором в призабойную зону тупиковой выработки, определяют по формуле

$$Q = \frac{l_1 S}{k_1 t} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}, \quad (7.6)$$

где k_1 — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи. Величина коэффициента турбулентной диффузии принимается по табл. 7.1 в зависимости от параметра $al_1/d_{\text{сп}}$ (где a — коэффи-

циепт структуры свободной струи, равный $0,06 \div 0,08$; l_1 — расстояние от конца нагнетательного трубопровода до забоя, м; $d_{\text{пр}}$ — приведенный диаметр трубопровода, м).

Таблица 7.1

$\frac{al_1}{d_{\text{пр}}}$	k_t	$\frac{al_1}{d_{\text{пр}}}$	k_t	$\frac{al_1}{d_{\text{пр}}}$	k_t	$\frac{al_1}{d_{\text{пр}}}$	k_t
0,012	0,019	0,047	0,068	0,082	0,113	0,275	0,276
0,015	0,023	0,050	0,071	0,085	0,116	0,300	0,287
0,017	0,026	0,052	0,075	0,087	0,119	0,335	0,300
0,020	0,030	0,055	0,078	0,090	0,122	0,375	0,335
0,022	0,033	0,057	0,081	0,092	0,125	0,495	0,395
0,025	0,037	0,060	0,084	0,095	0,127	0,540	0,460
0,027	0,040	0,062	0,088	0,097	0,130	0,670	0,529
0,030	0,044	0,065	0,091	0,100	0,133	0,845	0,600
0,032	0,047	0,067	0,094	0,125	0,161	1,100	0,675
0,035	0,051	0,070	0,097	0,150	0,186	1,500	0,744
0,037	0,054	0,072	0,100	0,175	0,209	2,160	0,810
0,040	0,058	0,075	0,103	0,200	0,229	3,350	0,873
0,042	0,061	0,077	0,106	0,225	0,247	5,900	0,925
0,045	0,065	0,080	0,110	0,250	0,262	13,500	0,965

Значение $d_{\text{пр}}$ принимают в зависимости от места положения трубопровода в выработке и его диаметра d равным:
при расположении трубопровода в углу выработки

$$d_{\text{пр}} = 2d; \quad (7.7)$$

при расположении трубопровода у боковой стенки (почвы, кровли) посередине высоты (ширины) выработки

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{2} d. \quad (7.8)$$

В остальных случаях приведенный диаметр находится путем интерполяции. При этом имеется в виду, что при расположении трубопровода в центре выработки $d_{\text{пр}} = d$.

Для того чтобы проветривание комбинированным способом было эффективным, расстояние от нагнетательного трубопровода до груди забоя не должно превышать максимальной дальнотойности свободной струи, определяемой из выражения

$$l_{\text{max}} = 0,5 \sqrt{S} (1 + 1/2a). \quad (7.9)$$

Конец всасывающего трубопровода должен располагаться у границы зоны отброса газов и пыли. За время, отводимое для проветривания, должна быть снижена концентрация вредных примесей до ПДК не только на участке l_1 , но и между концом нагнетательного трубопровода и границей зоны отброса.

Чтобы не происходило распространения вредных примесей по выработке дальше границы зоны отброса их при взрыве, количество воздуха, удаляемого из проветриваемого объема всасывающим вентилятором, должно быть больше количества воздуха, подаваемого в забой нагнетательным вентилятором. Исходя из этого и из условия обеспечения в выработке минимально допустимой скорости вентиляционной струи, расход воздуха, поступающего в приемное отверстие всасывающего трубопровода, определяют по формуле

$$Q_1 = Q + v_{\min} S, \quad (7.10)$$

где Q — количество воздуха, подаваемого в забой нагнетательным вентилятором, $\text{м}^3/\text{с}$; v_{\min} — минимально допустимая скорость вентиляционной струи, $\text{м}/\text{с}$.

Расчет количества воздуха, подаваемого нагнетательным вентилятором в призабойную зону, производят в следующей последовательности.

1. Определяют количество пыли N , образующейся при взрыве заряда ВВ, по формуле (1.1) или (1.6).

2. По формуле (1.2) или (1.9) определяют длину выработки l , загрязняемую пылью и газами при взрыве ВВ.

3. Рассчитывают начальную запыленность воздуха в проветриваемом объеме по формуле (4.8).

4. Находят приведенный диаметр трубопровода по формуле (7.7) или (7.8). Если расположение его в выработке нестандартное, приведенный диаметр трубопровода определяют путем интерполяции.

5. Рассчитывают значение параметра $al_1/d_{\text{пр}}$.

6. По табл. 7.1 находят значение коэффициента турбулентной диффузии.

7. По формуле (7.6) определяют количество воздуха, которое необходимо подавать в забой нагнетательным вентилятором.

8. Определяют количество воздуха, удаляемого из проветриваемого объема всасывающим вентилятором, по формуле (7.10).

Пример. Определить количество воздуха, которое должно подаваться нагнетательным вентилятором и удаляться из призабойной зоны всасывающим вентилятором при проветривании тупиковой выработки после взрыва шпурового заряда ВВ величиной 10 кг. Исходные данные для расчета: $S=10 \text{ м}^2$; $l_{\text{м}}=1,8 \text{ м}$; $\gamma=2800 \text{ кг}/\text{м}^3$; $f=12$; $n_d=2 \text{ мг}/\text{м}^3$; $n'=0$; $t=15 \text{ мин}$; $l_1=10 \text{ м}$. Трубопровод расположен у боковой стенки посередине высоты выработки, диаметр его $d=0,5 \text{ м}$.

Решение. Согласно расчетам, приведенным в предыдущем примере, длина участка выработки, загрязненного при взрыве заряда, $l=40 \text{ м}$, начальная запыленность в зоне отброса $n_0=2590 \text{ мг}/\text{м}^3$.

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot 0,5 = 0,7 \text{ м};$$

$$\frac{al_1}{d_{\text{пр}}} = 0,07 \cdot 10 : 0,7 = 1.$$

По табл. 7.1 находим, что $k_t=0,646$. Тогда

$$Q = 10 \cdot 10 : 0,646 : 15 : 60 \ln(2590 : 2) = 1,25 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q_1 = 1,25 + 0,25 \cdot 10 = 3,75 \text{ м}^3/\text{с}.$$

7.3. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при непрерывных пылевыведениях

При нахождении источника пылевыведения в призабойной зоне снижение концентрации выделяющейся пыли до ПДК как при нагнетательном, так и при комбинированном способах проветривания осуществляется за счет воздуха, подаваемого нагнетательным вентилятором.

Рассмотрим процесс проветривания призабойной части тупиковой выработки, в которой имеется источник непрерывного выведения пыли с переменной интенсивностью.

Взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения F и скоростью выхода воздуха из нагнетательного трубопровода U_0 описывается зависимостью (2.42).

Введем обозначение

$$\varphi_T = \psi l_1 [0,816/(2al_1/d + 0,417)]^2, \quad (7.11)$$

где φ_T — коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения, $\text{с}^2/\text{м}^2$; ψ — коэффициент, зависящий от вида производственного процесса, $\text{с}^2/\text{м}^3$; a — коэффициент структуры свободной струи; d — диаметр трубопровода, м; l_1 — расстояние от трубопровода до забоя, м.

С учетом принятого обозначения уравнение (2.42) можно записать в виде

$$F = F_0 (1 + \varphi_T U_0^2), \quad (7.12)$$

где F — интенсивность пылевыведения в проветриваемой выработке, $\text{мг}/\text{с}$; F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, $\text{мг}/\text{с}$.

Количество пыли, выделяемой за время dt в призабойную часть выработки источником непрерывного пылевыведения,

$$F_0 (1 + \varphi_T U_0^2) dt. \quad (7.13)$$

Если по нагнетательному трубопроводу подается Q $\text{м}^3/\text{с}$ воздуха с начальной запыленностью n' $\text{мг}/\text{м}^3$, то за время dt в призабойную зону будет дополнительно внесено пыли в количестве

$$Qn'dt. \quad (7.14)$$

За это же время dt ядром постоянной массы из призабойной зоны будет внесено пыли

$$Qk_1 ndt + Qn' (1 - k_1) dt, \quad (7.15)$$

где k_1 — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи; n — средняя запыленность воздуха в призабойной зоне в данный момент времени, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Разность между количеством пыли, добавившейся в призабойную зону за время dt , и количеством пыли, вынесенной из нее ядром

ром постоянной массы за это же время, равна изменению количества пыли в проветриваемом объеме

$$Vdn, \quad (7.16)$$

где V — объем призабойной зоны, м³.

С учетом выражений (7.13) — (7.16) процесс изменения запыленности в призабойной зоне выработки может быть описан уравнением

$$dn/dt = [F_0 (1 + \varphi_T U_0^2) + Qk_t n' - Qk_t n]/V. \quad (7.17)$$

Интегрируя данное уравнение, получим

$$\frac{V}{Qk_t} \ln \left[n - \frac{F_0 (1 + \varphi_T U_0^2)}{Qk_t} - n' \right] + C = -t. \quad (7.18)$$

Значение постоянной интегрирования C определим из начальных условий. При $t=0$ начальная запыленность воздуха в проветриваемом объеме равна n_0 , тогда

$$C = \frac{V}{Qk_t} \ln \left[n_0 - \frac{F_0 (1 + \varphi_T U_0^2)}{Qk_t} - n' \right]. \quad (7.19)$$

Подставляя значение C в уравнение (7.18) и решая его относительно n , получим

$$n = n' + \frac{F_0 (1 + \varphi_T U_0^2)}{Qk_t} + \left[n_0 - n' - \frac{F_0 (1 + \varphi_T U_0^2)}{Qk_t} \right] \exp \left(-\frac{Qk_t t}{V} \right), \quad (7.20)$$

где t — время проветривания, с; n_0 — запыленность воздуха в выработки в начале проветривания, мг/м³.

При непрерывном проветривании, когда t достаточно велико, третьим членом правой части уравнения (7.20) можно пренебречь и привести его к виду

$$n = n' + F_0 (1 + \varphi_T U_0^2) / (Qk_t). \quad (7.21)$$

Средняя скорость струи в выходном отверстии трубопровода U_0 может быть выражена через расход воздуха Q и диаметр трубопровода d

$$U_0 = 1,27Q/d^2. \quad (7.22)$$

Подставив в уравнение (7.21) вместо U_0 его значение из выражения (7.22), получим

$$n = n' + F_0 / (Qk_t) + 1,62\varphi_T F_0 Q / (k_t d^4). \quad (7.23)$$

Полученное выражение является уравнением проветривания тупиковой выработки при переменной интенсивности источника непрерывного пылевыделения. Оно выражает зависимость запыленности в призабойной части выработки от расхода воздуха на проветри-

вание, показателей пылевыведения, диаметра трубопровода и удаления его от забоя.

Зависимость запыленности от расхода воздуха такая же, как и для сквозных выработок. При увеличении его запыленность воздуха вначале уменьшается, затем, достигнув минимума, начинает возрастать.

Приравняв первую производную функции (7.23) по Q нулю, найдем, что минимум запыленности в выработке обеспечивается при расходе воздуха

$$Q = 0,7957V\sqrt{\varphi_T}. \quad (7.24)$$

Подставив полученное значение Q в уравнение (7.23), определим значение минимальной запыленности, которая может быть достигнута за счет вентиляции в призабойной части тупиковой выработки при непрерывном выделении пыли в ней,

$$n_{\min} = n' + 2,55F_0 \sqrt{\varphi_T / (k_f d^2)}. \quad (7.25)$$

В зависимости от значений показателей пылевыведения, диаметра трубопровода и расположения его в выработке n_{\min} , как и в сквозных выработках, может быть больше, равна или меньше ПДК (см. рис. 4.2).

В первом случае кривая, выражающая зависимость запыленности от расхода воздуха, проходит выше уровня ПДК. Следовательно, в данном случае снизить запыленность в выработке до ПДК средствами одной вентиляции невозможно.

Во втором случае санитарный уровень запыленности достигается лишь при одном расходе воздуха, определяемом из выражения (7.24). При всех других расходах воздуха запыленность будет выше ПДК.

В третьем случае, когда $n_{\min} < n_d$, существует область значений расхода воздуха от Q_1 до Q_2 , при которых запыленность в выработке не превышает допустимый уровень. Значения Q_1 и Q_2 могут быть определены при решении уравнения (7.23) относительно Q при $n = n_d$

$$Q_{1,2} = \frac{0,3k_f d^4}{\varphi_T F_0} \left[n_d - n' \pm \sqrt{(n_d - n')^2 \frac{6,5\varphi_T F_0^2}{k_f^2 d^4}} \right]. \quad (7.26)$$

Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания тупиковой выработки при непрерывных пылевыведениях, производят в следующей последовательности.

1. Выбирают диаметр трубопровода.
2. Определяют приведенный диаметр трубопровода в соответствии с рекомендациями, приведенными выше.
3. Рассчитывают параметр ai_1/\bar{a}_{np} и по табл. 7.1 находят коэффициент турбулентной диффузии.
4. По формуле (7.11) определяют значение коэффициента φ_T , характеризующего приращение интенсивности пылевыведения.

Значения Ψ при расчете Q_T принимают на основании экспериментальных данных. При отсутствии таковых, они могут быть приняты по табл. 2.4.

5. Из выражения (7.25) находят минимальную концентрацию пыли, которая может быть достигнута при выбранном диаметре трубопровода.

При $n_{\min} > n_d$ выбирают больший диаметр трубопровода и расчет повторяют.

6. Если $n_{\min} \leq n_d$, по формуле (7.26) определяют требуемое количество воздуха.

При получении двух значений расхода воздуха Q_1 и Q_2 к расчету принимают расход воздуха Q , отвечающий условию $Q_1 \leq Q \leq Q_2$.

Пример. Определить количество воздуха, необходимого для проветривания тупикового забоя нагнетательным способом при бурении шпуров двумя перфораторами ПР-30к по породам с $f=14$; $n_d=4$ мг/м³; $n'=0$; $l_1=10$ м.

Решение. В соответствии с данными, приведенными в табл. 2.4, принимаем $F_0=1,5$ мг/с, $\psi=0,01$ с²/м³.

Выбираем трубопровод диаметром 0,3 м.

Так как трубопровод предусмотрено расположить в углу выработки, то

$$d_{np} = 2d = 2 \cdot 0,3 = 0,6 \text{ м,}$$

$$al_1/d_{np} = 0,07 \cdot 10 : 0,6 = 1,167.$$

По табл. 7.1 находим, что $k_1=0,687$.

$$Q_T = \bar{v} \cdot \bar{v}_1 \cdot 10 \left(\frac{0,816}{2 \cdot 0,07 \cdot 10 : 0,3 + 0,417} \right)^2 = 0,0026 \text{ с}^2/\text{м}^2;$$

$$n_{\min} = 0 + 2,55 \cdot 1,5 \sqrt{0,0026} : 0,687 : 0,3^2 = 3,15 \text{ мг/м}^3 < n_d;$$

$$Q_{1,2} = \frac{0,3 \cdot 0,687 \cdot 0,3}{0,0026 \cdot 1,5} \left(\pm \sqrt{\frac{6,5 \cdot 0,0026 \cdot 1,5^2}{0,687^2 \cdot 0,3^4}} \right) = 0,428 (4 \pm 2,46);$$

$$Q_1 = 0,66 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_2 = 2,76 \text{ м}^3/\text{с}.$$

С учетом обеспечения минимально допустимой скорости вентиляционной струи принимаем $Q=2,5$ м³/с.

7.4. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания при электросварочных работах

Особенности пылевыделения при электросварочных работах, на которые указывалось в главе 2, определяют особый подход к расчету количества воздуха, необходимого для проветривания горных выработок, в которых производятся электросварочные работы. Особенность расчета заключается в наличии двух режимов проветривания: с переменной и постоянной интенсивностью пылевыделения. Допустимый уровень запыленности воздуха при переменной интенсивности не всегда может быть достигнут. В этом случае расход воздуха определяют по максимальной постоянной интенсивности пылевыделения.

Процесс изменения концентрации пыли в призабойной части тупиковой выработки при режимах проветривания с переменной

интенсивностью пылевыведения описывается уравнением (7.23). При режимах проветривания с постоянной интенсивностью пылевыведения изменение запыленности в зависимости от расхода воздуха описывается уравнением

$$n = n' + F_{\max}/(Qk_d), \quad (7.27)$$

где F_{\max} — максимальная интенсивность пылевыведения, мг/с. Количество воздуха, обеспечивающего минимальную запыленность при переменной интенсивности пылевыведения, минимальная запыленность, достигаемая при переменной интенсивности, и расход воздуха, необходимого для проветривания, могут быть определены соответственно по уравнениям (7.24), (7.25) и (7.26). Значение F_0 , входящего в уравнения (7.25) и (7.26), принимают на основании экспериментальных данных. Если имеются данные по удельному пылевыведению, F_0 рассчитывают по формуле (4.31).

Количество воздуха, необходимое для снижения запыленности до ПДК при постоянной интенсивности пылевыведения,

$$Q = F_{\max}/[k_d(n_d - n')]. \quad (7.28)$$

Значение максимальной интенсивности пылевыведения принимается на основании экспериментальных данных или рассчитывается по формуле (4.32).

Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания тупиковой выработки, в призабойной части которой производят электросварочные работы, производят в следующей последовательности.

1. Выбирают диаметр трубопровода.

2. Определяют приведенный диаметр трубопровода, учитывающий положение его в выработке. Расчет производят по формуле (7.7) или (7.8). При нестандартном расположении трубопровода в выработке приведенный диаметр его определяют интерполированием.

3. Рассчитывают параметр $al_1/d_{\text{тр}}$.

4. По табл. 7.1 находят значение коэффициента турбулентной диффузии.

5. Из выражения (7.11) определяют значение показателя φ_1 , характеризующего приращение интенсивности при увеличении скорости выхода воздуха из нагнетательного трубопровода. Значение Ψ , входящего в выражение (7.11), принимают в соответствии с данными, приведенными в п. 2.3.

6. Определяют минимальную запыленность, которая может быть достигнута в диапазоне скоростей вентиляционной струи, соответствующих переменной интенсивности пылевыведения. Расчет производят по формуле (7.25).

7. Определяют количество воздуха, необходимого для проветривания. При $n_{\min} \leq n_d$ его рассчитывают по уравнению (7.26), при $n_{\min} > n_d$ — по уравнению (7.28) с учетом зависимости (4.32). Если расход воздуха, определенный по уравнению (7.28), получится большим и его невозможно подать в выработку, необходимо вы-

брать трубопровод большего диаметра, чтобы $n_{\min} \leq n_d$, и расчет повторить.

Пример. Определить количество воздуха, которое необходимо подавать в забой тупиковой выработки при ведении электросварочных работ электродами МР-3 при $n_d = 4$ мг/м³; $n' = 0$; $l_1 = 10$ м.

Решение. Найдем для электродов МР-3 $F_0 = 7,1$ мг/с; $F_{\max} = 27,4$ мг/с; $\psi = 0,145$ м²/м³ (см. п. 2.3).

Принимаем диаметр трубопровода $d = 0,3$ м,

$$d_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\psi} \cdot d = \sqrt[3]{0,145} \cdot 0,3 = 0,42 \text{ м};$$

$$a l_1 / d_{\text{пр}} = 0,07 \cdot 10 : 0,42 = 1,67.$$

По табл. 7.1 находим, что $k_l = 0,76$.

$$\varphi_2 = 0,145 \cdot 10 \left(\frac{0,816}{2 \cdot 0,07 \cdot 10 : 0,3 + 0,417} \right)^2 = 0,037 \text{ с}^2/\text{м}^3;$$

$$n_{\min} = 2,55 \cdot 7,1 \sqrt{0,037} : 0,76 : 0,3^3 = 51 \text{ мг/м}^3.$$

Так как $n_{\min} > n_d$, расход воздуха определяем по формуле (7.28)

$$Q = 27,4 : 0,76 : 4 = 9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

При увеличении диаметра трубопровода невозможно добиться снижения запыленности до ПДК при режимах проветривания, соответствующих переменной интенсивности пылевыделения. Окончательно принимаем: $Q = 9$ м³/с.

7.5. Выбор вентиляционного оборудования

Конечная цель расчета проветривания тупиковой выработки заключается в правильном выборе вентиляционного оборудования, обеспечивающего подачу в выработку свежего воздуха в количестве, достаточном для поддержания в пей нормальных санитарно-гигиенических условий труда. Основным вентиляционным оборудованием, применяемым для проветривания тупиковых выработок на рудниках, являются вентиляторы и вентиляционные трубы. Чаще применяются осевые вентиляторы с электрическим приводом, одно- и двухступенчатые. Благодаря внутреннему расположению двигателя осевые вентиляторы компактны и удобны для соединения их на последовательную работу при проветривании протяженных выработок.

Для проветривания длинных тупиковых выработок большого сечения применяются центробежные вентиляторы.

Осевые вентиляторы выпускаются производительностью от 0,5 до 7,5 м³/с с напором от 300 до 5700 Па, центробежные — производительностью от 0,5 до 30 м³/с с напором от 640 до 6100 Па.

Для подачи свежего воздуха в забой и удаления загрязненного воздуха из забоя применяют жесткие и гибкие вентиляционные трубы. Из жестких применяются металлические и фанерные трубы. Металлические трубы изготавливаются из листового железа толщиной от 0,7 до 3 мм диаметром от 400 до 1000 мм. Длина звеньев труб составляет обычно 2—4 м. Масса труб в зависимости от их длины и диаметра вместе с деталями соединений колеблется в пределах от 20 до 260 кг. Коэффициент аэродинамического сопротивления равен 0,00245—0,00345 Н·с²/м⁴.

Между собой металлические трубы соединяются или по типу водосточных труб, когда конец одного звена вставляется в начало другого, или при помощи фланцев, желобчатых хомутов и др. При любом соединении необходимо обеспечивать хорошую плотность стыков путем применения прокладок из резины, обмазки, стыков специальной замазкой и т. п.

Фанерные трубы изготавливаются из двухслойной фанеры. Диаметр труб 300 мм, длина 6,7 м, толщина стенки 10 мм, масса 1 м трубы 10 кг. Внутренняя и наружная поверхности труб покрываются этилолевым лаком. Соединение труб на прямых участках производится фанерными кольцевыми муфтами, на поворотах — металлическими коленами. Фанерные трубы легче металлических, имеют высокую механическую прочность, небольшой коэффициент аэродинамического сопротивления ($0,00146—0,00226 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$), значительный срок службы, удобны в обращении. Недостатком фанерных труб является малый диаметр, что позволяет использовать их только для проветривания выработок небольшой протяженности с малым расходом воздуха.

Из гибких труб применяют матерчатые трубы типа М (МУ), изготавливаемые из двусторонней прорезиненной ткани «чефер». Длина основных звеньев 20 м, дополнительных — 10 и 5 м, диаметр 300, 400, 500, 600 и 1000 мм. Соединяют трубы между собой специальными стыковыми стальными кольцами, вшитыми в концы каждого звена. При возрастании статического давления внутри трубопровода он раздувается и происходит самоуплотнение стыков. Матерчатые трубопроводы имеют небольшую массу, легко монтируются и демонтируются, имеют небольшое число стыков, благодаря чему утечки воздуха невелики. К недостаткам труб типа М относятся небольшая механическая прочность и невозможность использования их при всасывающем проветривании.

В последние годы все большее распространение на рудниках получают гибкие вентиляционные трубы из синтетических материалов: текстолита, пластика, капрола, лавсана и др. Текстовинитовые трубы изготавливаются из плотной ткани, покрытой с двух сторон полихлорвиниловой пластмассой. Диаметр труб 500, 600 и 700 мм, длина звеньев — 5, 10 и 15 м. Отдельные звенья соединяются между собой с помощью металлических муфт и хомутов. Текстовинитовые трубы имеют небольшую массу, устойчивы против коррозии, кислот, щелочей и масла, долговечны. Коэффициент аэродинамического сопротивления текстовинитовых труб составляет $0,00127—0,00157 \text{ Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$. Недостатком текстовинитовых труб является невысокая механическая прочность и невозможность использования при всасывающем проветривании.

Пластикатовые трубы — это трубы из пластмассы, приготовленной на основе полихлорвиниловой смолы. В отличие от текстовинитовых труб они не имеют матерчатой основы.

Выбор вентиляционного оборудования производится на основе расчета количества воздуха, необходимого для проветривания выработки.

Рассчитанное количество воздуха должно быть достаточным для создания нормальных санитарно-гигиенических условий не только по пылевому фактору, но и по другим факторам, а также для обеспечения необходимой скорости вентиляционной струи.

Требуемая производительность вентилятора рассчитывается по формуле

$$Q_v = pQ, \quad (7.29)$$

где p — коэффициент, учитывающий утечки воздуха; Q — количество воздуха, которое должно быть подано в забой проветриваемой выработки, м³/с.

Коэффициент утечек воздуха при подаче его по металлическим или фанерным трубам определяют из выражения

$$p = \left(\frac{1}{3} k_y d \frac{L_{тр}}{l_{зн}} \sqrt{R'} + 1 \right)^2, \quad (7.30)$$

где k_y — коэффициент удельной стыковой воздухопроницаемости; d — диаметр трубопровода, м; $l_{зн}$ — длина отдельного звена трубопровода, м; R' — аэродинамическое сопротивление трубопровода без учета утечек, Н·с²/м⁸.

Значение коэффициента удельной стыковой воздухопроницаемости принимается равным 0,0025—0,003 при удовлетворительном качестве сборки трубопровода и 0,001—0,002 — при хорошем.

Аэродинамическое сопротивление трубопроводов определяется по формуле

$$R' = 6,45\alpha L_{тр}/d^5. \quad (7.31)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления металлических труб в зависимости от их диаметра составляет [19]:

$d, \text{ м}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\alpha \cdot 10^3, \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$	3,6	3,5	3,0	3,0	2,9	2,8	2,5

Для изношенных металлических труб коэффициент α увеличивают на 25 %.

Коэффициент аэродинамического сопротивления матерчатых труб в зависимости от их диаметра равен:

$d, \text{ м}$	0,3	0,4	0,5	0,6
$\alpha \cdot 10^3, \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$	4,5	3,5	3,0	2,5

Требуемая депрессия вентилятора определяется из выражения

$$h_v = R'QQ_v. \quad (7.32)$$

В справочной литературе по рудничной вентиляции для матерчатых трубопроводов приводятся значения сопротивления его с учетом утечек в зависимости от длины. Депрессию вентилятора в этом случае определяют по формуле

$$h_v = RQ_v^2. \quad (7.33)$$

где R — аэродинамическое сопротивление трубопровода с учетом утечек, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6$.

По найденным значениям Q_v и h_v производится выбор соответствующего вентилятора.

8. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЕСПЫЛИВАЮЩЕГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК

8.1. Использование эжекционных насадок при нагнетательном проветривании

Свердловским горным институтом совместно со штабом ВГСЧ Урала МЦМ СССР разработан способ проветривания тупиковых выработок с использованием эжекционных насадок к трубопроводу.

Тупиковая выработка проветривается за счет вентилятора (рис. 8.1), установленного в основной выработке, работающего на нагнетание. Для увеличения количества воздуха, циркулирующего

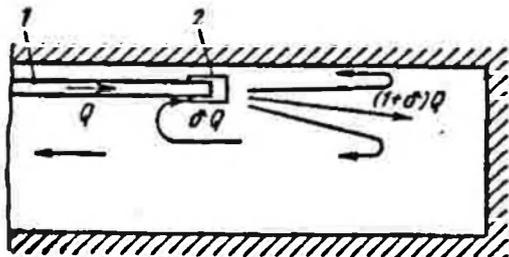


Рис. 8.1. Схема эжекционно-рециркуляционного проветривания тупиковой выработки

в призабойной части выработки, на конце нагнетательного трубопровода 1 монтируется специальная эжекционная насадка. За счет эжектирующего действия струи, выходящей из нагнетательного трубопровода, часть воздуха, поступающего из забоя, подсасывается в насадку и после смешивания с чистым воздухом вновь направляется в призабойную зону выработки. При непрерывных пылевыделениях для очистки повторно используемого воздуха от пыли в насадке устанавливается фильтр. При проветривании выработок после взрыва ВВ установка фильтра нецелесообразна, так как он быстро будет забит пылью и количество эжектируемого воздуха резко уменьшится.

Проветривание призабойной зоны с применением насадки, как и без нее, происходит за счет действия свободной турбулентной струи.

Для случая проветривания призабойной части тупиковой выработки после взрывных работ, когда непрерывное выделение вред-

ных примесей отсутствует, а очистку повторно направляемого в забой воздуха производить нецелесообразно, уравнение, описывающее процесс изменения средней концентрации вредных примесей в призабойной зоне имеет вид

$$n = n' + (n_0 - n') \exp\{-(1 + \delta) Q k_t t / [(1 + \delta k_t) V]\}, \quad (8.1)$$

где n' — концентрация вредных примесей в свежем воздухе, используемом для проветривания, мг/м³; n_0 — начальное содержание вредных примесей в проветриваемом объеме после взрыва ВВ, мг/м³; k_t — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи, исходящей из трубопровода; Q — расход свежего воздуха на проветривание, м³/с; V — объем призабойной зоны, м³; t — время проветривания, с; δ — коэффициент эжекции.

$$\delta = Q_3 / Q, \quad (8.2)$$

где Q_3 — расход эжектируемого воздуха, м³/с.

Общее количество воздуха, участвующего в проветривании призабойной зоны,

$$Q_{\text{общ}} = (1 + \delta) Q \quad (8.3)$$

Процесс проветривания остальной части выработки при взрывных работах протекает так же, как при нагнетательном способе.

Концентрация вредных примесей в любой момент времени t после начала проветривания на расстоянии L от зоны смешения может быть найдена из уравнения (7.1).

При $L = l_1$, уравнение (7.1) описывает изменение во времени концентрации вредных примесей в исходящей из призабойной зоны струе

$$n_n = 0,89 n_0 [S l_1 / (Q t)]^3 / \rho. \quad (8.4)$$

Между средней концентрацией вредных примесей в призабойной зоне n и концентрацией их в исходящей из забоя струе n_n при проветривании с эжекционной насадкой существует зависимость

$$n = n_n (1 + \delta k_t) / [k_t (1 + \delta)]. \quad (8.5)$$

Уравнение, связывающее концентрацию вредных примесей в выработке на расстоянии L от забоя с концентрацией их в зоне смешения, имеет вид

$$n_L = n k_t (1 + \delta) L^2 / [(1 + \delta k_t) l_1^2 \rho^2]. \quad (8.6)$$

Если длина порветриваемой выработки L_n не превышает $L_{кр}$ ($L_{кр}$ — критическая длина выработки, на которой максимальная концентрация вредных примесей в газовой волне за счет ее растяжения снижается до допустимой), то для того чтобы концентрация вредных примесей в любом месте выработки не превышала допустимую, в призабойной зоне она должна снизиться до величины

$$n_1 = n_n (1 + \delta k_t) \rho^2 l_1^2 / [k_t (1 + \delta) L_n^2]. \quad (8.7)$$

Решив уравнение (8.1) относительно t при $n=n_1$, найдем, что при проветривания чистым воздухом ($n'=0$) на это потребуется время

$$t = \frac{V(1+\delta k_t)}{k_t Q(1+\delta)} \ln \frac{k_t(1+\delta)n_0 L_n^2}{(1+\delta k_t)n_d \rho^2 l_1^2}. \quad (8.8)$$

Заменив логарифмическую функцию степенной, получим

$$t = \frac{V(1+\delta k_t)}{k_t Q(1+\delta)} \sqrt[3]{\frac{k_t(1+\delta)n_0 L_n^2}{(1+\delta k_t)n_d \rho^2 l_1^2}}. \quad (8.9)$$

Время проветривания выработки без эжекционной насадки ($\delta=0$)

$$t_{\text{б.н}} = \frac{V}{k_t Q} \sqrt[3]{\frac{k_t n_0 L_n^2}{n_d \rho^2 l_1^2}}. \quad (8.10)$$

Из выражений (8.9) и (8.10) следует, что

$$t/t_{\text{б.н}} = \sqrt[3]{[(1+\delta k_t)/(1+\delta)]^2}. \quad (8.11)$$

В практических условиях k_t изменяется от 0,3 до 0,9 и в среднем составляет 0,6. Коэффициент эжекции насадок $\delta=0,6 \div 1,0$. Подставив их значения в выражение (8.11), найдем, что время проветривания выработки после взрывных работ за счет использования эжекционных насадок может быть сокращено на 10—14 %.

При непрерывном выделении вредных примесей в забое, происходящем с постоянной интенсивностью, не зависящей от параметров свободной струи (газовыделение при работе машин с двигателями внутреннего сгорания, выделение природных газов и т. п.), уравнение проветривания имеет вид

$$n = \frac{n'}{(1+\delta\eta)} + \frac{F}{k_t Q} \cdot \frac{1+\delta[1-(1-k_t)(1-\eta)]}{(1-\delta)(1+\delta\eta)}, \quad (8.12)$$

где η — степень очистки воздуха от вредных примесей в эжекционной насадке.

Решив уравнение (8.12) относительно Q при $n=n_d$, получим выражение для определения количества воздуха, которое должен подавать в забой вентилятор при наличии эжекционной насадки,

$$Q = \frac{F}{k_t [n_d - n'/(1+\delta\eta)]} \cdot \frac{1+\delta[1-(1-k_t)(1-\eta)]}{(1+\delta)(1+\delta\eta)}. \quad (8.13)$$

Если очистка повторно используемого воздуха от вредных примесей не производится ($\eta=0$), уравнение (8.13) принимает вид

$$Q = F(1+\delta k_t)/[k_t(n_d - n')(1+\delta)]. \quad (8.14)$$

При нагнетательном способе проветривания (без насадки) количество воздуха, которое необходимо подавать в забой,

$$Q_{\text{б.н}} = F/[k_t(n_d - n')]. \quad (8.15)$$

Сравнивая выражения (8.14) и (8.15) между собой нетрудно заметить, что даже при отсутствии очистки повторно используемого воздуха от вредных примесей при наличии эжекционной насадки требуется меньше воздуха, чем без нее.

Поделив почленно уравнение (8.14) на (8.15), получим

$$Q/Q_{0,n} = (1 + \delta k_t)/(1 + \delta). \quad (8.16)$$

Подставив в уравнение (8.16) среднее значение $k_t = 0,6$ и $\delta = 0,6 \div 1,0$, найдем, что использование эжекционных насадок позволяет сократить расход свежего воздуха на проветривание при непрерывных газовыделениях в забое на 15—20 % даже без очистки повторно используемого воздуха. Это связано с повышением коэффициента полезного действия вентиляционной струи, выходящей из нагнетательного трубопровода, за счет лучшего перемешивания воздуха в проветриваемом объеме, в результате чего концентрация вредных примесей в ядре постоянных масс свободной струи увеличивается.

Выражения для определения времени проветривания при взрывных работах (8.9) и (8.10) и требуемого для проветривания расхода воздуха при непрерывных газовыделениях (8.14) и (8.15) для эжекционно-рециркуляционного и нагнетательного способов вентиляции могут быть представлены в виде

$$t = \frac{V}{k_n Q} \sqrt[3]{\frac{k_n n_0 L_n^2}{n_n p^2 l_1^2}}; \quad (8.17)$$

$$Q = F/[k_n (n_n - n')], \quad (8.18)$$

где k_n — коэффициент полезного действия струи.

$$k_n = k_t (1 + \delta)/(1 + \delta k_t). \quad (8.19)$$

Уравнения (8.17) и (8.18) могут быть использованы для определения необходимого количества воздуха как при наличии эжекционной насадки, так и без нее.

При отсутствии насадки ($\delta = 0$), как это видно из уравнения (8.19), $k_n = k_t$.

При увеличении коэффициента эжекции значение k_n возрастает, при $\delta \rightarrow \infty$ оно стремится к единице.

Интенсивность выделения пыли не является постоянной величиной, а зависит от параметров свободной струи. Эта зависимость при нагнетательном способе проветривания описывается уравнением (2.42), которое с учетом выражения (7.22) можно привести к виду

$$F = F_0 [1 + 1,08 \psi l_1 Q^2 / (2a l_1 d + 0,417 d^2)^2], \quad (8.20)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, мг/с; ψ — коэффициент, зависящий от вида производственного процесса, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения в проветриваемой выработке, с²/м³, l_1 — расстояние от

конца вентиляционного трубопровода до забоя, м; \bar{a} — диаметр трубопровода, м; a — коэффициент структуры свободной струи; Q — количество воздуха, выходящего из трубопровода, м³/с.

При наличии на трубопроводе эжекционной насадки эта зависимость будет иметь вид:

$$F = F_0 [1 + 1,08\psi l_1 (1 + \delta)^2 Q^2 / (2al_1 d_0 + 0,417d_0^2)^2], \quad (8.21)$$

где \bar{a}_0 — диаметр выходного отверстия эжекционной насадки, м.

Подставив значение F из выражения (8.21) в (8.12), получим уравнение проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом с эжекционной насадкой при непрерывных пылевыведениях

$$n = \frac{n'}{1 + \delta\eta} + \frac{F_0}{k_t Q} \left[1 + \frac{1,08\psi l_1 Q^2 (1 + \delta)^2}{(2al_1 d_0 + 0,417d_0^2)^2} \right] \frac{1 + \delta\eta + \delta k_t (1 - \eta)}{(1 + \delta)(1 + \delta\eta)}. \quad (8.22)$$

При отсутствии очистки от пыли повторно используемого воздуха ($\eta = 0$)

$$n = n' + \frac{F_0}{k_t Q} \left[1 + \frac{1,08\psi l_1 Q^2 (1 + \delta)^2}{(2al_1 d_0 + 0,417d_0^2)^2} \right] \frac{1 + \delta k_t}{1 + \delta}. \quad (8.23)$$

Уравнение проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом без насадки при непрерывных пылевыведениях имеет вид

$$n = n' + \frac{F_0}{k_t Q} \left[1 + \frac{1,08\psi l_1 Q^2}{(2al_1 d + 0,417d^2)^2} \right]. \quad (8.24)$$

Значение коэффициента эжекции для насадок, как указывалось выше, не превышает 0,6—1. Отношение диаметра насадки к диаметру нагнетательного трубопровода в соответствии с выполненными исследованиями составляет 1,1—1,15. Величина k_t изменяется от 0,3 до 0,9. Значение l_1 в соответствии с ПБ не должно превышать 10 м. Величина ψ для различных производственных процессов колеблется от 0,0023 до 0,015 с²/м³ (см. табл. 2.4).

Расчеты, выполненные по формулам (8.23) и (8.24) при указанных выше значениях входящих в них величин и изменении расхода свежего воздуха на проветривание от 2 до 5 м³/с, показали, что отношение запыленности воздуха в выработке при наличии эжекционной насадки на нагнетательном трубопроводе к запыленности воздуха в выработке при проветривании ее нагнетательным способом без насадки изменяется от 0,8 до 2,2. Это свидетельствует о необходимости очистки повторно используемого воздуха от пыли при непрерывных пылевыведениях, т. е. насадка должна быть не только эжекционной, но и фильтрующей. Расчеты, выполненные по формуле (8.22), показали, что применение фильтров в эжекционных насадках со степенью очистки 0,8—0,9 позволяет снизить запыленность в 1,5—2 раза.

Зависимость (8.22) имеет минимум при

$$Q = (1,92al_1d_0 + 0,4d_0^2)/(1 + \delta)\sqrt{\psi l_1} \quad (8.25)$$

Подставив значение Q из (8.25) в выражение (8.22), найдем минимальную запыленность, достигаемую при использовании эжекционно-фильтрующей насадки,

$$n_{\min} = \frac{2F_0\sqrt{\psi l_1}[1 + \delta\eta + \delta k_t(1 - \eta)] + n'}{k_t(1 + \delta\eta)(1,92al_1d_0 + 0,4d_0^2) + 1 + \delta\eta} \quad (8.26)$$

Если $n_{\min} > n_d$, это означает, что при данных значениях интенсивности пылевыведения, коэффициента эжекции, степени очистки воздуха от пыли, размерах трубопровода и насадки снизить запыленность до ПДК невозможно. Необходимо выбрать другой трубопровод и насадку больших размеров. Если и это сделать невозможно, следует предусмотреть мероприятия по снижению интенсивности пылевыведения.

Если $n_{\min} < n_d$, расход воздуха для проветривания определяют по формуле

$$Q = \frac{0,5}{a_1 b} \left[n_d - \frac{n'}{1 + \delta\eta} \pm \sqrt{\left(n_d - \frac{n'}{1 + \delta\eta} \right)^2 - 4a_1^2 b} \right], \quad (8.27)$$

где

$$a_1 = F_0[1 + \delta\eta + \delta k_t(1 - \eta)]/[k_t(1 + \delta)(1 + \delta\eta)]; \quad (8.28)$$

$$b = 1,08\psi l_1(1 + \delta)^2/(2al_1d_0 + 0,417d_0^2). \quad (8.29)$$

При расчете по формуле (8.27) будет получено два расхода воздуха Q_1 и Q_2 , ограничивающих область расходов воздуха, при которых запыленность не превышает ПДК. К расчету можно принимать любое значение Q , лежащее в этой области.

Если $n_{\min} = n_d$, снижение концентрации возможно лишь при расходе воздуха, определяемом из выражения (8.25). При всех остальных расходах воздуха запыленность будет превышать ПДК.

С целью проверки справедливости полученных зависимостей на шахте «Южная» Березовского рудника им. С. М. Кирова были выполнены экспериментальные исследования при взрывных работах и бурении шпуров*.

Сущность экспериментов при взрывных работах заключалась в наблюдении за изменением содержания окиси углерода в забое тупиковой выработки после взрыва ВВ при наличии эжекционной насадки и без нее. Диаметр нагнетательного трубопровода равнялся 0,3 м, насадки — 0,5 м. Длина насадки 1,2 м. Отставание труб от забоя при проветривании как с насадкой, так и без нее составляло 12 м. Количество воздуха, поступающего в забой по трубопроводу, было равным 1,9 м³/с. Количество эжектируемого возду-

* При взрывных работах эксперименты были выполнены канд. техн. наук Л. А. Шимовым; при бурении — канд. техн. наук В. Е. Родным.

ха при наличии насадки составляло $1,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Коэффициент эжекции $\delta=0,53$. Значение коэффициента турбулентной диффузии свободной струи, создаваемой при выходе воздуха из трубопровода без насадки, рассчитанное по результатам замеров концентрации окиси углерода, было равным $0,44$.

Усредненные результаты экспериментов приведены на рис. 8.2. Экспериментальные точки удовлетворительно расположились около расчетных кривых, построенных по уравнению (8.1).

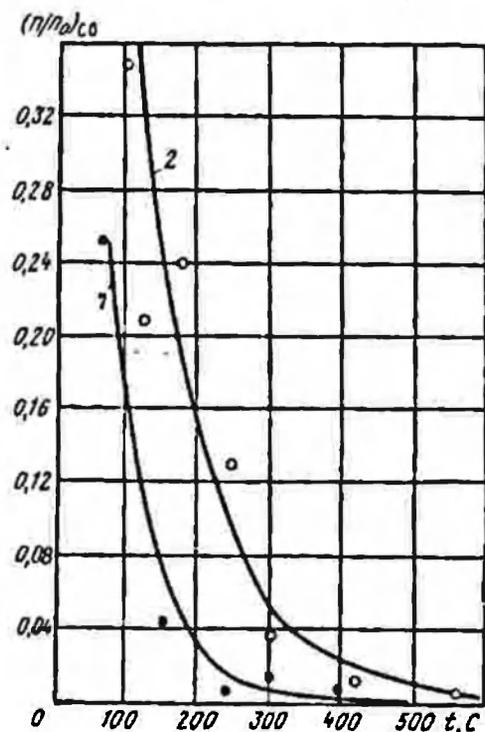
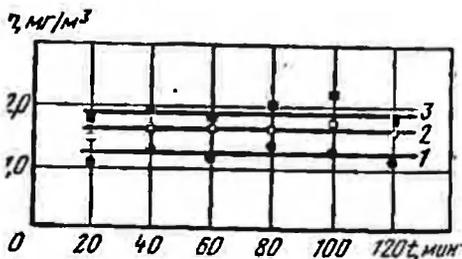


Рис. 8.3. График зависимости концентрации пыли l в забое тупиковой выработки от времени бурения шпуров t :

1 — при наличии эжекционной насадки на нагнетательном трубопроводе с фильтром; 2 — при насадке без фильтра; 3 — без насадки

Рис. 8.2. График зависимости концентрации (l/l_0) CO в забое тупиковой выработки от времени t после взрыва заряда ВВ:

1 — при эжекционно-рециркуляционном проветривании; 2 — при нагнетательном проветривании



Эксперименты при бурении шпуров производили в тупиковой выработке с площадью поперечного сечения $7,4 \text{ м}^2$, воздух для проветривания поступал по нагнетательному трубопроводу диаметром $0,5 \text{ м}$ в количестве $1,9 \text{ м}^3/\text{с}$. Диаметр эжекционной насадки составлял $0,7 \text{ м}$. Количество подсосываемого насадкой воздуха было равным $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$, коэффициент эжекции — $0,63$. Запыленность свежего воздуха, подаваемого по нагнетательному трубопроводу, составляла $0,26 \text{ мг}/\text{м}^3$. Для очистки повторно используемого для проветривания воздуха от пыли насадка была снабжена фильтром из иглопробивной ткани. Эксперименты заключались в наблюдении за запыленностью воздуха в забое при бурении шпуров двумя перфораторами ПР-30к при проветривании без насадки, с насадкой без фильтра и с насадкой с фильтром. Показатели пылевыведения при бурении двумя перфораторами составили: $F_0=1,5 \text{ мг}/\text{с}$; $\Psi=0,04 \text{ с}^2/\text{м}^3$. Результаты экспериментов приведены на рис. 8.3. Экспериментальные точки удовлетворительно расположились около

до расчетных прямых, что подтверждает справедливость уравнений (8.24), (8.23) и (8.22), по которым рассчитывалась запыленность. В выработке при применении эжекционной насадки с фильтром она снизилась на 35 %, при применении насадки без фильтра — на 13 %*.

С целью определения работоспособности и выбора рациональной конструкции эжекционно-фильтрующей насадки были проведены исследования на специальном испытательном стенде, состоящем из вентилятора СВМ-5, воздуховода длиной 20 м из фанерных труб диаметром 300 мм, воздухомерных трубок и микроанометров.

На конце воздуховода монтировалась эжекционно-фильтрующая насадка (ЭФН), состоящая из двух частей: камеры смешивания потоков и камеры фильтрации воздуха, выполненной в виде жесткого каркаса с размещенным на нем фильтрующим материалом. В некоторых насадках предусматривались устройства для повышения эжектирующего действия (конфузоры, сердечники и т. п.).

Всего было испытано пять конструкций насадок (рис. 8.4). Для определения общего, подаваемого по нагнетательному трубопроводу, и эжектируемого насадкой расхода воздуха с помощью воздухомерных трубок и микроанометров измеряли скоростные напоры в соответствующих сечениях.

За критерий эффективности испытываемой насадки принимался коэффициент эжекции $\delta = Q_3/Q$.

Значения коэффициента эжекции, полученные для разных типов насадок к вентиляционной трубе диаметром 300 мм при длине камеры смешивания потоков 1,2 м, приведены ниже.

Тип насадки	ЭФН-1	ЭФН-2	ЭФН-3	ЭФН-4	ЭФН-5
коэффициент эжекции:					
без фильтра	0,61	0,32	0,29	0,67	0,97
с фильтром	0,56	0,21	0,21	0,44	0,93

Хорошо себя зарекомендовали насадки с цилиндрической камерой смешивания. Значительный эффект получается при применении сердечника, вставляемого в камеру смешивания. Уменьшая площадь живого сечения камеры, он увеличивает скорость движения воздуха в ней. Коэффициент эжекции насадки при этом возрастает более чем в 1,5 раза, но конструкция ЭФН усложняется. На коэффициент эжекции насадок влияет длина камеры смешивания потоков (рис. 8.5). При увеличении ее коэффициент вначале растет почти по прямой, затем кривая его роста постепенно выполаживается. Для каждой конструкции насадки существует оптимальная длина камеры смешивания потоков, обеспечивающая максимальное значение коэффициента эжекции. Исследования насадок разного диаметра показали, что для увеличения коэффициента эжекции длина камеры должна составлять 3—4 диаметра воздухо-

* Исследования выполнены канд. техн. наук В. Е. Родным и горным инженером А. А. Шядловским.

вода. Диаметр насадки должен быть больше диаметра воздуховода на 180—200 мм.

При использовании сердечника для повышения эжектирующего действия насадки его диаметр должен быть равным 0,7 диаметра нагнетательного трубопровода; а длина — 0,8—0,9 длины камеры смешивания потоков. Наиболее простой по конструкции и

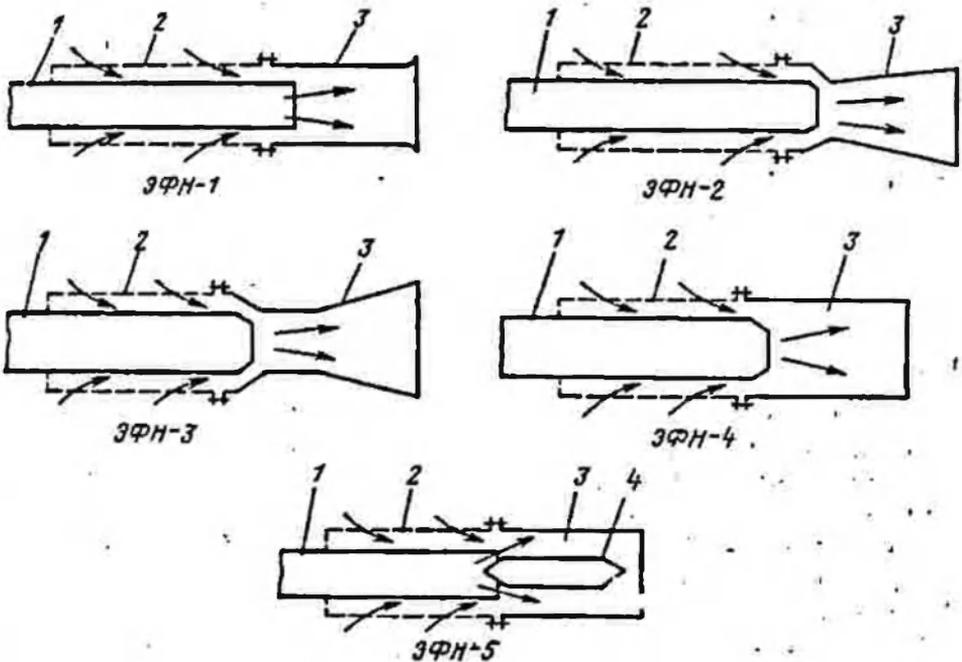


Рис. 8.4. Схема эжекционно-фильтрующих насадок (ЭФН):

1 — нагнетательный трубопровод; 2 — камера фильтрации; 3 — камера смешивания потоков; 4 — сердечник

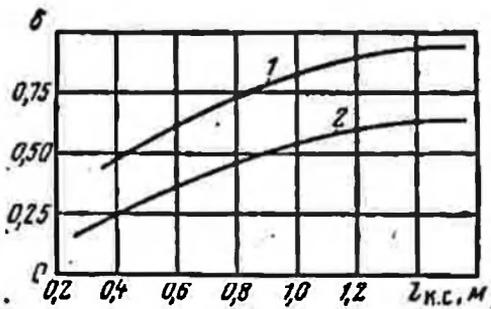


Рис. 8.5. График зависимости коэффициента эжекции насадки δ от длины камеры смешивания потоков $L_{к.с.}$: 1 и 2 — соответственно для ЭФН-1 и ЭФН-5

достаточно эффективной является насадка ЭФН-1. Рекомендуемые значения диаметра и длины камеры смешивания потоков насадки ЭФН-1:

диаметр трубопровода, мм	300	400	500	600	800
диаметр насадки, мм	480	580	680	780	1000
длина камеры смешивания потоков, м	1,2	1,4	1,7	1,9	2,5

Длина участка фильтрации насадки должна составлять не менее 1,2 длины камеры смешивания потоков. При такой длине участка фильтрации и применении фильтров из иглопробивных тка-

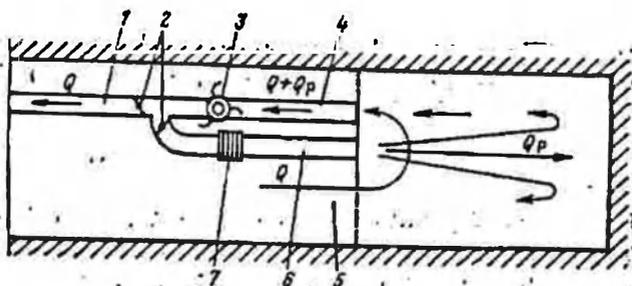
ней коэффициент эжекции насадки по мере насыщения фильтра пылью снижается незначительно. В связи с этим фильтр можно использовать до полного его насыщения пылью (250 г на 1 м²) в течение 15—20 дней.

8.2. Повторное использование воздуха при всасывающем проветривании

Для повышения эффективности проветривания тупиковой выработки при взрывных работах В. Н. Ворониным предложен способ проветривания, названный им комбинированным с рециркуляционным побуждением (рис. 8.6).

Рис. 8.6. Схема комбинированного проветривания тупиковой выработки с рециркуляционным побуждением:

1 — основной нагнетательный трубопровод; 2 — шиберы; 3 — вентилятор; 4 — всасывающий трубопровод; 5 — проветриваемая выработка; 6 — рециркуляционный трубопровод; 7 — фильтр



Выработка проветривается с помощью всасывающего вентилятора, установленного в 40—70 м от забоя. Для проветривания призабойной зоны активной вентиляционной струей дополнительно устанавливается короткий рециркуляционный трубопровод, ответвляющийся от нагнетательного става труб. Им были проанализированы возможности данного способа проветривания при периодических выделениях вредных примесей. Основное достоинство этого способа — достижение при работе одного вентилятора такого же производственного эффекта, как и при работе двух вентиляторов при других вариантах комбинированного проветривания.

В. Н. Ворониным были выведены расчетные формулы для определения расхода воздуха, необходимого для проветривания, и оптимального значения коэффициента рециркуляции; установлена область эффективного использования этого способа по сравнению с нагнетательным. Однако утечки воздуха в трубопроводах В. Н. Ворониным не учитывались, в то время как они существенно влияют на процесс проветривания выработки. Особенно это относится к утечкам воздуха в основном трубопроводе.

Исследованиями Свердловского горного института установлено, что комбинированный способ с рециркуляционным побуждением позволяет повысить эффективность проветривания выработки не только при взрывных работах, но и при непрерывных выделениях вредных примесей, если производится очистка от них повторно используемого воздуха. Рассмотрим процесс проветривания тупиковой выработки применительно к схеме, показанной на рис. 8.6. В призабойной зоне, объем которой V , расположен источник не-

прерывного выделения вредных примесей с интенсивностью F , мг/с. Производительность вентилятора

$$Q_v = Q + Q_p, \quad (8.30)$$

где Q — количество воздуха, поступающего в призабойную зону по выработке, м³/с; Q_p — количество воздуха, используемого для проветривания повторно, м³/с.

Введем обозначения:

$$\varepsilon = \bar{Q}_p / \bar{Q}_v, \quad (8.31)$$

где ε — коэффициент рециркуляции;

$$\eta = (n_1 - n_2) / n_1, \quad (8.32)$$

где η — степень очистки воздуха от вредных примесей в фильтре; n_1 — концентрация вредных примесей в рециркуляционном трубопроводе перед фильтром, мг/м³; n_2 — то же, за фильтром;

$$\rho = Q / Q_1, \quad (8.33)$$

где ρ — коэффициент потерь воздуха в основном нагнетательном трубопроводе I ; \bar{Q}_1 — количество воздуха, выдаваемого из тупиковой выработки по трубопроводу I , м³/с.

Утечками воздуха во всасывающем и рециркуляционном трубопроводах ввиду незначительной протяженности их можно пренебречь. Действие всасывающего конца трубопровода распространяется в глубь проветриваемого объема незначительно, поэтому можно считать, что весь воздух, поступающий по выработке, засасывается без заметной деформации скоростного поля в призабойной зоне.

С учетом принятых обозначений и допущений дифференциальное уравнение проветривания выработки имеет вид

$$\frac{dn}{dt} = \frac{F}{V} - \frac{Q_v \varepsilon k_t}{V} \cdot \frac{(1-\varepsilon+\rho\varepsilon\eta)n + (1-\varepsilon)(1-\eta)n'}{(1-\eta)\rho\varepsilon k_t + 1 - \varepsilon + \rho\varepsilon\eta}, \quad (8.34)$$

где n — содержание вредных примесей в призабойной зоне тупиковой выработки в любой момент времени t , мг/м³; n' — содержание вредных примесей в свежем воздухе, поступающем в устье выработки, мг/м³; k_t — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи, выходящей из рециркуляционного трубопровода.

При решении уравнения (8.34) относительно n получим

$$\begin{aligned} n = & \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon)n'}{\eta\rho\varepsilon + 1 - \varepsilon} + \frac{F}{Q_v \varepsilon k_t} \cdot \frac{(1-\eta)\rho\varepsilon k_t + 1 - \varepsilon + \rho\varepsilon\eta}{\eta\rho\varepsilon + 1 - \varepsilon} + \\ & + \left[n_0 - \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon)n'}{\eta\rho\varepsilon + 1 - \varepsilon} - \frac{F}{Q_v \varepsilon k_t} \cdot \frac{(1-\eta)\rho\varepsilon k_t + 1 - \varepsilon + \rho\varepsilon\eta}{\eta\rho\varepsilon + 1 - \varepsilon} \right] \times \\ & \times \exp \left[- \frac{\eta\rho\varepsilon + 1 - \varepsilon}{(1-\eta)\rho\varepsilon k_t + 1 - \varepsilon + \rho\varepsilon\eta} \cdot \frac{Q_v \varepsilon k_t t}{V} \right], \quad (8.35) \end{aligned}$$

где n_0 — концентрация вредных примесей в призабойной зоне в начале проветривания, мг/м³; t — продолжительность проветривания, с.

Приравняв нулю в выражении (8.35) значение F , получим уравнение, описывающее изменение концентрации вредных примесей в призабойной зоне при проветривании после взрыва ВВ.

$$n = \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon)n'}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon} + \left[n_0 - \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon)n'}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon} \right] \exp \times \\ \times \left(- \frac{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon}{(1-\eta) p \varepsilon k_t + 1 - \varepsilon + p \varepsilon \eta} \cdot \frac{Q_B k_t \varepsilon t}{V} \right). \quad (8.36)$$

При отсутствии очистки повторно используемого для проветривания воздуха от вредных примесей ($\eta=0$) оно примет вид

$$n = n' + (n_0 - n') \exp \left[- \frac{(1-\varepsilon)\varepsilon}{p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon} \cdot \frac{Q_B k_t \varepsilon t}{V} \right]. \quad (8.37)$$

Решив уравнение (8.34) относительно t и заменив n предельно допустимой концентрацией n_d , получим выражение для определения продолжительности проветривания тупиковой выработки после взрывных работ рециркуляционным способом

$$t = \frac{V(1-\varepsilon + p k_t \varepsilon)}{Q_B k_t \varepsilon (1-\varepsilon)} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (8.38)$$

Взяв производную от t по ε и приравняв ее нулю, получим значение коэффициента рециркуляции, при котором продолжительность проветривания выработки будет минимальной,

$$\varepsilon = 1 / (1 + \sqrt{p k_t}). \quad (8.39)$$

Объем призабойной зоны

$$V = l_1 S, \quad (8.40)$$

где S — площадь поперечного сечения выработки, м²; l_1 — расстояние от вентиляционных труб до забоя, м.

С учетом (8.39) и (8.40) продолжительность проветривания выработки после взрывных работ рециркуляционным способом

$$t = \frac{l_1 S (1 + \sqrt{p k_t})^2}{k_t Q_B} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (8.41)$$

Откуда производительность вентилятора

$$Q_B = \frac{l_1 S}{k_t t} (1 + \sqrt{p k_t})^2 \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (8.42)$$

Количество воздуха, направляемого в рециркуляционный трубопровод, должно быть равным

$$Q_B = \frac{\varepsilon l_1 S}{k_t t} (1 + \sqrt{p k_t})^2 \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}. \quad (8.43)$$

: Для оценки с энергетической точки зрения целесообразности применения рециркуляционного способа проветривания при периодических выделениях вредных примесей обозначим сопротивления основного, нагнетательного и всасывающего трубопроводов соответственно через R_1 , R_2 и R_3 .

Чтобы получить необходимое распределение воздуха, соотношение между R_1 и R_2 должно иметь определенное значение, зависящее от коэффициента рециркуляции и утечек воздуха. Его можно найти из условия

$$h_1 = h_2, \quad (8.44)$$

где h_1 , h_2 — потери депрессии соответственно в рециркуляционном и основном нагнетательном трубопроводах

$$h_1 = R_1 Q^2 = R_1 Q_2^2 \varepsilon^2, \quad (8.45)$$

$$h_2 = R_2 Q Q_1, \quad (8.46)$$

где Q и Q_1 — расходы воздуха соответственно в начале и в конце основного нагнетательного трубопровода, м³/с.

$$Q = Q_2 (1 - \varepsilon); \quad (8.47)$$

$$Q_1 = Q/\rho. \quad (8.48)$$

С учетом (8.45) — (8.48)

$$R_1/R_2 = (1 - \varepsilon)^2 / (\varepsilon^2 \rho). \quad (8.49)$$

Пренебрегая потерями депрессии на создание скоростного напора на выходе из трубопроводов, расход энергии при рециркуляционном проветривании тупиковой выработки определим из выражения

$$W_p = W_1 + W_2 + W_3, \quad (8.50)$$

где W_1 , W_2 , W_3 — затраты энергии на преодоление сопротивления трения соответственно в рециркуляционном, основном нагнетательном и всасывающем трубопроводах.

$$W_1 = R_1 Q^3 = R_1 Q_2^3 \varepsilon^3, \quad (8.51)$$

$$W_2 = R_2 Q Q_1, \quad (8.52)$$

При наличии равномерно распределенных утечек в основном нагнетательном трубопроводе

$$W_3 = h_2 Q_0 = R_2 Q_0^3, \quad (8.53)$$

где Q_0 — эквивалентный расход воздуха.

Под эквивалентным расходом воздуха подразумевается некоторое постоянное количество воздуха, на прохождение которого по трубопроводу с сопротивлением R_2 расходуется такая же энергия, как на прохождение переменного количества воздуха с расхо-

дом в начальном сечении Q_0 и, в конечном Q_1 . Из уравнений (8.46) и (8.53) следует, что

$$Q_0 = \sqrt{Q_0 Q_1} \quad (8.54)$$

С учетом (8.49) — (8.53) и (8.39)

$$W_D = \left[R_2 k_t \frac{1 + \sqrt{k_t}}{(1 + \sqrt{pk_t})^3} + R_3 \right] Q_0^3 \quad (8.55)$$

Расход энергии на проветривание той же выработки нагнетательным способом

$$W_H = (R_2 + R_3) C_H^3 \rho_1 \sqrt{p_1} \quad (8.56)$$

где Q_H — количество воздуха, поступающего в забой, м³/с; ρ_1 — коэффициент потерь воздуха при нагнетательном проветривании.

Определим отношение продолжительности проветривания выработки рециркуляционным способом к продолжительности проветривания нагнетанием при плотных воздуховодах ($p = p_1 = 1$) и одинаковых затратах энергии

$$W_D = W_H \quad (8.57)$$

Продолжительность проветривания выработки нагнетанием, по В. Н. Воронину,

$$t_H = 0,96 S \sqrt[3]{l_1 L^3 (n_0 - n') / [\rho_1^2 (n_0 - n')] / Q_H} \quad (8.58)$$

где L — длина выработки, м.

Выражение (8.41) для определения продолжительности проветривания при рециркуляционном способе можно привести к виду

$$t = l_1 S (1 + \sqrt{pk_t})^2 \sqrt[3]{(n_0 - n') / (n_H - n')} / (k_t Q_D) \quad (8.59)$$

Из уравнений (8.58) и (8.59) с учетом того, что $R_3 = R_2 l_3 / (L - l_3)$, следует

$$t/t_H = \frac{1,04 (1 + \sqrt{k_t})^2}{k_t L} \sqrt[3]{l_1^2 \left[\frac{k_t (L - l_3)}{(1 + \sqrt{k_t})^2} + l_3 \right]} \quad (8.60)$$

где l_3 — длина всасывающего трубопровода при рециркуляционном способе проветривания, м.

Расчеты, выполненные по формуле (8.60), показали, что при длине выработки более 80—130 м целесообразно применять рециркуляционный способ проветривания, так как при одинаковых энергетических затратах продолжительность проветривания при этом способе меньше, чем при нагнетательном ($t/t_H < 1$).

При наличии утечек воздуха в нагнетательном трубопроводе длина выработки, при которой целесообразно переходить с нагнетательного способа проветривания на рециркуляционный, будет еще меньше.

Оценим целесообразность использования рециркуляционного

способа проветривания тупиковой выработки при непрерывных выделениях вредных примесей в призабойной зоне. В этом случае уравнение (8.35) будет иметь вид

$$n = \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon)n'}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon} + \frac{F}{Q_n k_t \varepsilon} \cdot \frac{(1-\eta) p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon + p \varepsilon \eta}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon}. \quad (8.61)$$

Из выражения (8.61) могут быть получены уравнения проветривания тупиковой выработки рециркуляционным способом при непрерывном выделении газов и пыли. Очистка повторно используемого воздуха от газов (природных, выделяющихся при работе машин с двигателями внутреннего сгорания) при рассматриваемой схеме проветривания практически производиться не может. Поэтому, приравняв в выражении (8.61) нулю значение степени очистки воздуха от вредных примесей η , получим уравнение, описывающее изменение концентрации вредных газов в выработке, проветриваемой по рассматриваемой схеме:

$$n = n' + \frac{F}{Q_n k_t \varepsilon} \cdot \frac{p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (8.62)$$

Решив уравнение (8.62) относительно Q_n при $n = n_d$, получим

$$Q_n = F(1 - \varepsilon + p k_t \varepsilon) / [k_t (n_d - n') (1 - \varepsilon) \varepsilon]. \quad (8.63)$$

Зависимость (8.63) имеет минимум при значении коэффициента рециркуляции, определяемом из выражения (8.39). Таким образом, оптимальное значение коэффициента рециркуляции при периодических и непрерывных выделениях газов одинаковое.

Подставляя значение ε из уравнения (8.39) в (8.63), найдем производительность вентилятора при рециркуляционном проветривании

$$Q_n = F \{1 + \sqrt{p k_t}\}^2 / [k_t (n_d - n')]. \quad (8.64)$$

Необходимое количество воздуха при нагнетательном способе проветривания

$$Q_n = F / [k_t (n_d - n')]. \quad (8.65)$$

Из уравнений (8.55), (8.56), (8.64) и (8.65) следует, что отношение затрат энергии на проветривание при непрерывном поступлении вредных примесей в призабойную зону тупиковой выработки при рециркуляционном и нагнетательном способах проветривания

$$\frac{W_p}{W_n} = \frac{(1 + \sqrt{p k_t})^2}{p_1 \sqrt{p_1}} \left[\frac{L - l_3}{L} \cdot \frac{k_t (1 + \sqrt{k_t})}{(1 + \sqrt{p k_t})^3} + \frac{l_3}{L} \right]. \quad (8.66)$$

Расчеты, произведенные по уравнению (8.66), показали, что при существующей длине тупиковых выработок $W_p/W_n > 1$, т. е. затраты энергии на проветривание при рециркуляционном способе больше, чем при проветривании выработки нагнетанием. Кроме того, при рециркуляционном проветривании требуется больший расход свежего воздуха. Таким образом, применять рециркуляцион-

ный способ для проветривания тупиковых выработок при непрерывных выделениях вредных примесей без очистки от них повторно используемого воздуха нецелесообразно.

Интенсивность выделения пыли в отличие от интенсивности газовыделений, как было выше установлено, не является постоянной величиной, а зависит от режимов проветривания. Чем выше интенсивность проветривания, тем больше пыли переходит во взвешенное состояние. Взаимосвязь между интенсивностью пылевыведения и параметрами свободной струи выражается зависимостью (7.12).

Подставив в выражение (8.61) значение F из (7.12), получим

$$n = \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon) n'}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon} + \frac{F_0 (1 + \varphi_T U_0^2)}{Q_B k_t \varepsilon} \frac{(1-\eta) p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon + p \varepsilon \eta}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon}, \quad (8.67)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, мг/с; φ_T — коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения, $\text{с}^2/\text{м}^2$; U_0 — скорость вентиляционной струи на выходе из рециркуляционного трубопровода, м/с.

Значение φ_T определяется из выражения (7.11) при $d = d_1$ (d_1 — диаметр рециркуляционного трубопровода, м).

Скорость вентиляционной струи в выходном отверстии рециркуляционного трубопровода

$$U_0 = 1,27 Q_B \varepsilon / d_1^2. \quad (8.68)$$

С учетом выражения (8.68) уравнение (8.67) можно записать в виде

$$n = \frac{(1-\eta)(1-\varepsilon) n'}{\eta p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon} + \frac{F_0 (1 + 1,62 \varphi_T Q_B^2 \varepsilon^2 / d_1^4)}{Q_B \varepsilon k_t} \frac{(1-\eta) p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon + p \varepsilon \eta}{\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon}. \quad (8.69)$$

Введем обозначения:

$$a_1 = (1-\eta)(1-\varepsilon) / (\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon); \quad (8.70)$$

$$a_2 = [(1-\eta)(p k_t \varepsilon + 1 - \varepsilon + p \varepsilon \eta)] / [\varepsilon k_t (\eta p \varepsilon + 1 - \varepsilon)]. \quad (8.71)$$

С учетом принятых обозначений уравнение (8.69) будет иметь вид

$$n = a_1 n' + a_2 F_0 / Q_B + 1,62 a_2 \varphi_T \varepsilon^2 F_0 / Q_B d_1^4. \quad (8.72)$$

Зависимость (8.72) имеет минимум при

$$Q_B = 0,79 d_1^2 / (\varepsilon \sqrt{\varphi_T}). \quad (8.73)$$

Подставив значение Q_B из уравнения (8.73) в (8.72), найдем минимальную запыленность воздуха, достигаемую в выработке при рассматриваемой схеме проветривания,

$$n_{\min} = a_1 n' + 2,55 a_2 F_0 \varepsilon \sqrt{\varphi_T} / d_1^2. \quad (8.74)$$

В зависимости от показателей пылевыведения, диаметра рециркуляционного трубопровода, расположения его в выработке, коэффициента рециркуляции и степени очистки от пыли используемого для повторного проветривания воздуха значение n_{\min} может быть больше, равно или меньше n_d .

В первом случае снизить запыленность воздуха в выработке до ПДК невозможно, для этого необходимо либо увеличить диаметр рециркуляционного трубопровода, либо предусмотреть мероприятия по снижению показателей пылевыведения.

Во втором случае допустимый уровень запыленности достигается лишь при одном значении производительности вентилятора, определяемой из выражения (8.73).

В третьем случае, когда $n_{\min} < n_d$, существует область значений $Q_{в.1}$, при которых запыленность воздуха в выработке не будет превышать ПДК. Значения $Q_{в.1}$ и $Q_{в.2}$, ограничивающие эту область, могут быть найдены при решении уравнения (8.72) относительно $Q_{в.1}$ при $n = n_d$

$$Q_{в.1,2} = \frac{0,3d_1^4}{a_1 \varphi_T e^2} \left[n_d - a_1 n' \pm \sqrt{(n_d - a_1 n')^2 - \frac{6,5a_2^2 \varphi_T F_0^2 e^2}{d_1^4}} \right]. \quad (8.75)$$

Сравнение энергетических затрат при рециркуляционном и нагнетательном способах проветривания показало, что первый способ экономичнее второго за счет того, что по основному трубопроводу l проходит незначительное количество воздуха.

Для очистки повторно используемого воздуха от пыли на рециркуляционной ветви трубопровода рекомендовано устанавливать фильтры из иглопробивных материалов. Как выше отмечалось, эти фильтры имеют малое сопротивление, большую пылеемкость (до $0,25 \text{ кг/м}^2$) и обеспечивают степень очистки воздуха от 80 до 98 % [13].

Для проверки зависимостей, полученных теоретическим путем, и установления эффективности рассматриваемого способа проветривания были выполнены экспериментальные исследования на шахте № 5 Березовского рудника им. С. М. Кирова в выработке с площадью поперечного сечения $6,2 \text{ м}^2$. Выработка проветривалась по схеме, приведенной на рис. 8.6. Расстояние от воздухопроводов 4 и 6 до забоя составляло 10 м. Для проветривания использовали фанерные трубы диаметром 0,3 м. Сущность исследований заключалась в наблюдении за изменением концентрации окиси углерода в забое выработки после взрывных работ. Эксперименты проводились по следующей методике,

После взрыва заряда ВВ определяли объем зоны выработки, загрязняемый вредными примесями и начальное содержание окиси углерода в ней. Затем включали вентилятор и через каждые 5 минут отбирали пробы воздуха в специальные камеры для последующего анализа в химлаборатории. Одновременно проводили дублирующий отбор проб газов рудничной атмосферы с помощью

индикаторных трубок. Измеряли количество воздуха, поступающего через рециркуляционный и всасывающий трубопроводы 4 и 6, а также в начале и в конце основного нагнетательного трубопровода.

Производительность вентилятора во время проведения экспериментов колебалась от 1,85 до 1,95 м³/с. Количество воздуха, проходящего через рециркуляционный трубопровод, изменялось от 0 до 1 м³/с, а коэффициент рециркуляции — от 0 до 0,51. При $\epsilon = 0$ проветривание выработки осуществлялось всасывающим способом. Коэффициент потерь воздуха в основном нагнетательном трубопроводе составлял 1,5—1,6.

Результаты экспериментальных наблюдений приведены на рис. 8.7. Из графиков видно, что даже при малом значении коэффициента рециркуляции ($\epsilon = 0,16$) рециркуляционный способ проветривания (сплошные линии) при равных расходах воздуха и одинаковом расстоянии конца вентиляционной трубы до забоя эффективнее всасывающего (пунктирная линия).

Наиболее эффективным является режим проветривания при $\epsilon = 0,5$, что близко к оптимальному значению коэффициента рециркуляции, определенному по уравнению (8.39). На рис. 8.8 данные, полученные при различных режимах рециркуляционного проветривания, представлены в координатах $\ln \frac{n_0}{n}$ и $D_1 = \frac{Q_{\text{вент}}(1-\epsilon)}{V[1+\epsilon(pk_f-1)]}$. Экспериментальные точки удовлетворительно расположились около прямой, построенной по уравнению (8.37), что подтверждает его справедливость.

Расчет проветривания при непрерывных пылевых выделениях. Учитывая, что при наличии фильтра на рециркуляционном трубопроводе, процесс проветривания призабойного пространства в принципе не отличается от нагнетательного проветривания, предложен приближенный способ расчета. Количество воздуха, которое необходимо подавать в забой при непрерывных пылевых выделениях, определяется, как при прямооточной нагнетательной схеме, по формуле

$$Q_p = \frac{0,3d_1^4}{F_0\Phi_T} \left[k_f n_d \eta \pm \sqrt{k_f^2 n_d^2 \eta^2 - \frac{6,5F_0^2 \Phi_T^2}{d_1^4}} \right] \quad (8.76)$$

Запыленность воздуха, подаваемого в забой, зависит от эффективности фильтра, установленного на рециркуляционном трубопроводе. Начальная запыленность воздуха, подаваемого в забой,

$$n' = (1 - \eta) n_d. \quad (8.77)$$

Количество свежего воздуха, подаваемого по выработке к всасывающему трубопроводу, должно обеспечить минимально допустимую скорость воздушного потока в выработке

$$Q = v_{\min} S, \quad (8.78)$$

где v_{\min} — минимально допустимая скорость воздушного потока в выработке, м/с; S — площадь поперечного сечения выработки, м².

Для этих условий

$$\varepsilon = Q_p / (Q_p + Q). \quad (8.79)$$

Необходимая производительность вентилятора

$$Q_{\text{в}} = Q_p + Q. \quad (8.80)$$

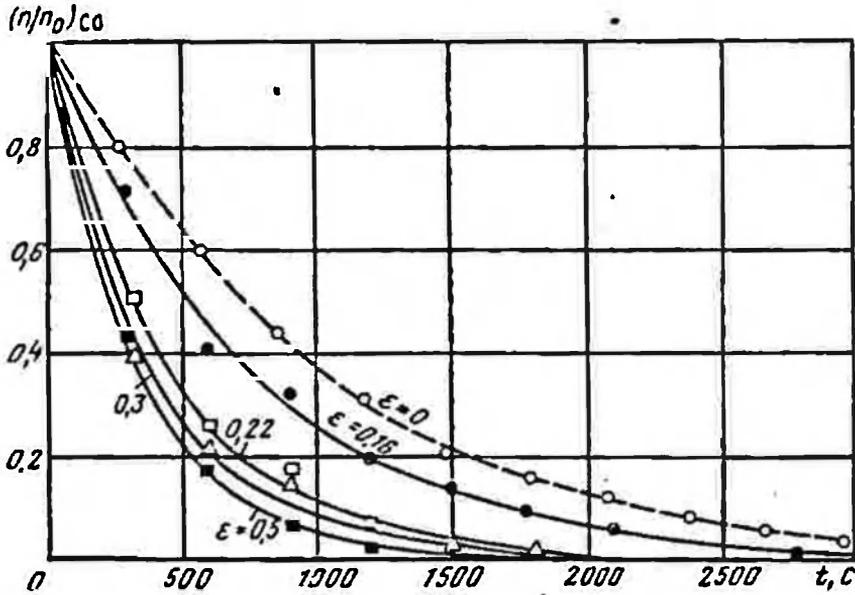


Рис. 8.7. График зависимости относительной концентрации окиси углерода $(n/n_0)_{CO}$ от времени проветривания

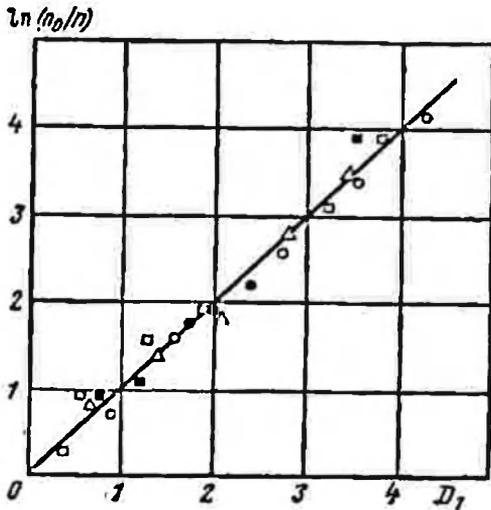


Рис. 8.8. График зависимости $\ln(n_0/n)$ от комплексного параметра D_1

Рассчитанная таким образом производительность вентилятора будет несколько больше требуемой в связи с тем, что в формулу (8.76) подставляется заниженное значение n' . Поскольку получается некоторый запас воздуха, то такое упрощение расчета вполне допустимо.

Порядок расчета проветривания по пылевому фактору следующий.

1. Задавшись диаметром выходного отверстия рециркуляционного трубопровода d_1 и оставанием труб от забоя l_1 , по формуле (7.11) определяют значение коэффициента φ_T , характеризующего приращение интенсивности пылевыведения для наиболее интенсивного источника непрерывного выделения пыли.

2. Из условия равенства подкоренного выражения уравнения (8.76) нулю определяют минимально допустимый диаметр рециркуляционного трубопровода.

$$d_1 = 1,6 \sqrt{F_0 \sqrt{\varphi_T} / ((k_1 r_{D1}^2))}. \quad (8.81)$$

По полученному значению d_1 выбирают ближайший больший диаметр труб.

3. Определяют приведенный диаметр трубопровода в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 7.2, рассчитывают параметр $ai_1/a_{пр}$ и по табл. 7.1 находят коэффициент турбулентной диффузии свободной струи.

4. По уравнению (8.76) находят количество воздуха, необходимое для подачи в забой по рециркуляционному трубопроводу.

5. По формуле (8.78) определяют количество воздуха, которое должно поступать к всасывающему отверстию трубопровода по выработке.

6. Вычисляют производительность вентилятора по формуле (8.80).

7. По формуле (1.1) определяют количество пыли, образующейся при взрыве заряда ВВ.

8. Рассчитывают длину зоны отброса продуктов взрыва по формуле (1.2).

9. Начальную запыленность в проветриваемом объеме находят по формуле (4.8).

10. Находят производительность вентилятора по формуле (8.42).

11. Из двух значений Q_B принимают большее и определяют количество воздуха, возвращаемого для повторного использования,

$$Q_p = Q_B / (1 + \sqrt{pk_t}). \quad (8.82)$$

12. Количество воздуха, которое должно поступать в призабойную зону по выработке, находят по формуле

$$Q = Q_B - Q_p. \quad (8.83)$$

13. Из двух значений Q , полученных по формулам (8.78) и (8.83), выбирают большее и определяют полный напор вентилятора

$$h_B = 6,45\alpha_2 L_2 Q_B^2 / d_2^5 + 6,45\alpha_3 L_3 Q^2 / d_3^5 + 0,084\gamma Q_B^2 / d_2^2. \quad (8.84)$$

14. По найденным значениям h_B и Q_B выбирают вентилятор. При этом необходимо учитывать, что расходы воздуха в рециркуляционной ветви при проветривании выработки после взрыва заряда ВВ и при непрерывных пылевыведениях могут быть разные. При

необходимости следует предусмотреть изменение с помощью задвижек расхода воздуха, поступающего по рециркуляционному трубопроводу, на время проветривания после взрыва ВВ.

8.3 Изменение режима работы вентилятора

Для сокращения времени проветривания тупиковых выработок при взрывных работах может быть использован так называемый реверсивный способ проветривания [14, 21].

Сущность его заключается в попеременном нагнетании и отсасывании воздуха из призабойной части тупиковой выработки.

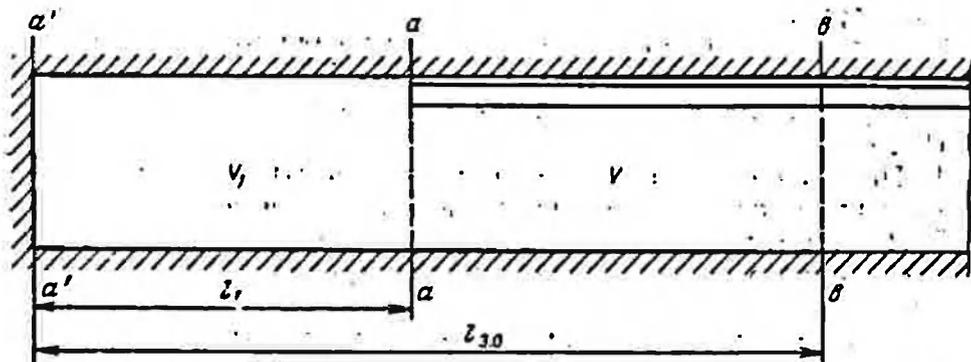


Рис. 8.9. Схема реверсивного проветривания тупиковой выработки

В отличие от других комбинированных способов проветривания воздух подается и отсасывается по одному трубопроводу. Отсасывание загрязненного воздуха эффективно только в той части выработки, которая заключена между границей зоны отброса и концом вентиляционной трубы. Призабойная часть выработки, ограниченная плоскостью, проходящей через конец вентиляционного трубопровода, наиболее эффективно проветривается при нагнетании воздуха в забой. Поэтому, меняя попеременно направление движения воздуха с таким расчетом, чтобы проветривание указанных частей выработки происходило при эффективных режимах и вредные примеси не распространялись далеко по выработке, можно сократить общее время проветривания выработки.

С целью установления рациональной области применения реверсивного способа проветривания проанализируем возможные его варианты.

Всасывание-нагнетание. При этом варианте реверсивного проветривания вентилятор вначале работает на всасывание, пока не проветрится от газов и пыли объем выработки V , ограниченный сечениями $a-a$ и $b-b$, проходящими через конец трубопровода и границу зоны отброса (рис. 8.9), затем переключается на нагнетание.

При анализе этого варианта реверсивного проветривания предположим, что при всасывании воздуха концентрация вредных при-

месей в объеме, ограниченном плоскостями $(a'-a')$ — $(a-a)$, не снижается. В действительности концентрация их будет несколько уменьшаться за счет молекулярной диффузии и конвективных токов, возникающих в результате разности температур газов в объеме $(a'-a')$ — $(a-a)$, и воздуха, поступающего для проветривания. Не принимая во внимание эти процессы, мы несколько завышаем расчетное время проветривания.

Проветривание выработки на участке $l_{3,0} - l_1$ осуществляется развитым турбулентным потоком. Благодаря наличию крупно- и мелкомасштабных пульсаций происходит интенсивное перемешивание вредных примесей, попадающих в поток. На некотором расстоянии от источника выделения вредных примесей их концентрация по сечению выравнивается и они выносятся потоком по всему сечению. Одновременно происходит разжижение вредных примесей воздухом при его смешении с проходящей газовой волной. При всасывающем проветривании свежий воздух, вынося вредные примеси, перемешивается с ними. Опыты показывают, что для проветривания выработки однократного обмена воздуха в ней недостаточно. Это связано с наличием турбулентных деформаций в потоке и конвективных токов, обусловленных разностью температур газов ВВ и воздуха в выработке. При соизмеримых скоростях воздушного потока и конвективных токов последние существенно влияют на эффективность проветривания.

При рассмотрении процесса проветривания объема V можно составить следующее дифференциальное уравнение:

$$Q(n_a - n) - V' \frac{dn}{dt} = 0 \quad (8.85)$$

где Q — количество свежего воздуха, поступающего в выработку для проветривания, $\text{м}^3/\text{с}$; n_a — концентрация газов у конца всасывающего трубопровода (в сечении $a-a$), $\text{мг}/\text{м}^3$; V' — объем загрязненного продуктами взрыва участка, выработки, расположенного между концом трубопровода и границей зоны отброса, в любой момент времени t , м^3 .

Взаимосвязь средней концентрации n в проветриваемом объеме и концентрацией n_a выражается уравнением

$$n = [n_a(V - Qt) + QKn_a t - Q(1 - K)n't]/V, \quad (8.86)$$

где V — объем выработки между сечениями $a-a$ и $b-b$, м^3 ; t — время от начала проветривания, с ; K — коэффициент, учитывающий снижение концентрации в объеме выработки, равно Qt ; n' — начальное содержание вредных примесей в свежем воздухе, $\text{мг}/\text{м}^3$.

После преобразований найдем

$$n_a = (nV - Qmn't)/(V - Qmt), \quad (8.87)$$

где m — коэффициент неполноты выноса газов, характеризующий эффективность проветривания.

$$m = 1 - K.$$

Объем загрязненной зоны

$$V' = V - Qm't, \quad (8.88)$$

где m' — коэффициент неполноты проветривания при однократном воздухообмене.

Поскольку физический смысл коэффициентов m и m' одинаков, то в первом приближении примем их равными. Тогда с учетом выражений (8.87) и (8.88) уравнение (8.85) примет вид

$$dn/dt = Q(n - n')V/(V - Qmt)^2. \quad (8.89)$$

При решении уравнения (8.89) относительно n получим

$$n = (n_0 - n') \exp(-Qt/(V - Qmt)) + n', \quad (8.90)$$

где n_0 — начальная концентрация вредных примесей в зоне отброса их при взрыве, мг/м³.

Уравнение (8.90) справедливо при $t \leq V/Qm$. При $t=0$, $n=n_0$, а при $t=V/Qm$, $n=n'$.

За время работы вентилятора на всасывание при рассматриваемом варианте проветривания выработка на участке $l_{3.0} - l_1$ должна быть полностью освобождена от вредных примесей. Решив уравнение (8.90) относительно t при $n=n'$, найдем время, которое для этого потребуется,

$$t_{вс} = V/(Qm). \quad (8.91)$$

Выразив объем V через площадь поперечного сечения выработки S , длину зоны отброса вредных примесей при взрыве $l_{3.0}$ и удаление вентиляционных труб от забоя l_1 , выражение (8.91) приведем к виду

$$t_{вс} = (l_{3.0} - l_1) S/(Qm). \quad (8.92)$$

При определении времени работы вентилятора на всасывание к величине, определяемой из выражения (8.92), должно быть добавлено время, необходимое для освобождения трубопровода от вредных примесей,

$$t_{тр} = (L - l_1) S_{тр}/(Qm), \quad (8.93)$$

где L — длина выработки, м; $S_{тр}$ — площадь поперечного сечения трубопровода, м².

С учетом выражений (8.92) и (8.93) общее время работы вентилятора в режиме всасывания должно быть не менее величины, определяемой из выражения

$$t_{во} = [(l_{3.0} - l_1) S + (L - l_1) S_{тр}]/(Qm). \quad (8.94)$$

За время работы вентилятора в режиме нагнетания содержание ядовитых газов и пыли в выработке на всем ее протяжении должно быть снижено до ПДК. Определяющим при расчете продолжительности нагнетательного режима является газовый фактор. Если длина выработки L не превышает значения $L_n = 450 A/S$

(A — масса заряда ВВ, кг), то время работы вентилятора в режиме нагнетания определяется по формуле В. Н. Воронина

$$t_{\text{н}} = (0,96S/Q) \sqrt[3]{l_1 L^2 \frac{n_0}{(\rho^2 n_{\text{д}})}} \quad (8.95)$$

где ρ — коэффициент потерь воздуха по длине трубопровода.

Если длина выработки L превышает величину $L_{\text{к}}$, то при определении $t_{\text{н}}$ в выражение (8.95) вместо L подставляют значение $L_{\text{к}}$. Тогда, произведя несложные преобразования, получим

$$t_{\text{н}} = 56,4/Q \sqrt[3]{l_1 A^2 S \frac{n_0}{(\rho^2 n_{\text{д}})}} \quad (8.96)$$

Общее время, необходимое для проветривания выработки после взрыва ВВ,

$$t = t_{\text{вс}} + t_{\text{н}} \quad (8.97)$$

С учетом (8.94) — (8.96) время проветривания выработки при варианте «всасывание-нагнетание» составит:

при $L < L_{\text{к}}$

$$t = \frac{1}{Q} \left[\frac{(l_{\text{в.о}} - l_1) S + (L - l_1) S_{\text{тр}}}{m} + 0,96S \sqrt[3]{\frac{l_1 L^2 n_0}{\rho^2 n_{\text{д}}}} \right]; \quad (8.98)$$

при $L > L_{\text{к}}$

$$t = \frac{1}{Q} \left[\frac{(l_{\text{в.о}} - l_1) S + (L - l_1) S_{\text{тр}}}{m} + 56,4 \sqrt[3]{\frac{l_1 A^2 S n_0}{\rho^2 n_{\text{д}}}} \right]. \quad (8.99)$$

Нагнетание-всасывание. При данном варианте реверсивного проветривания вентилятор работает вначале на нагнетание до снижения концентрации газов на участке выработки от забоя до конца вентиляционного трубопровода до допустимого уровня, затем переключается на всасывание.

Процесс снижения концентрации газов в зоне смешения при работе вентилятора на нагнетание происходит по закону, описываемому уравнением

$$n = n_0 \exp(-Qtk_i/V_1). \quad (8.100)$$

Решив это уравнение относительно t , найдем время работы вентилятора на нагнетание, необходимое для снижения концентрации газов в объеме V_1 до допустимого уровня $n_{\text{д}}$,

$$t_{\text{н}} = \frac{V_1}{k_i Q} \ln \frac{n_0}{n_{\text{д}}} \quad (8.101)$$

Выразив объем зоны смешения через площадь поперечного сечения выработки и расстояние от забоя до конца вентиляционных труб l_1 , получим

$$t_{\text{н}} = \frac{l_1 S}{k_i Q} \ln \frac{n_0}{n_{\text{д}}} \quad (8.102)$$

За время работы вентилятора на нагнетание загрязненный объем выработки увеличится на величину, равную объему поданного воздуха, т. е. $Q t_n$,

$$\Delta V = Q t_n = S \frac{l_1}{k_f} \ln \frac{n_0}{n_d} \quad (8.103)$$

Общий газозагрязненный объем выработки составит

$$V' = S l_1 \left(\frac{l_{3.0}}{l_1} + \frac{1}{k_f} \ln \frac{n_0}{n_d} \right) \quad (8.104)$$

Концентрация газов на участке l_1 к началу работы вентилятора на всасывание не будет превышать допустимую. В остальной части загрязненного объема $V = V' - V_1$ средняя концентрация газов будет составлять

$$n_{ср} = \frac{n_0 l_{3.0} / l_1 - n_d}{(1/k_f) \ln(n_0/n_d) + l_{3.0}/l_1 - 1} \quad (8.105)$$

С учетом (8.92), (8.104) и (8.105) для снижения концентрации ядовитых газов в объеме V до допустимого уровня при работе вентилятора в режиме всасывания потребуется время

$$t'_{вс} = \frac{S l_1}{Q m} \left(\frac{1}{k_f} \ln \frac{n_0}{n_d} + \frac{l_{3.0}}{l_1} - 1 \right) \quad (8.106)$$

Наблюдения показывают, что после переключения вентилятора с нагнетания на всасывание концентрация вредных примесей в призабойной зоне начинает возрастать. Рост ее наблюдается до тех пор, пока не проветрится объем V . После этого концентрация вредных примесей в призабойной зоне начинает уменьшаться. Для того, чтобы она снова снизилась до ПДК, требуется примерно столько же времени, сколько проработал до того вентилятор в режиме всасывания. В связи с этим продолжительность всасывающего режима при рассматриваемом варианте реверсивного способа проветривания

$$t_{во} = 2 t'_{вс} = 2 \frac{S l_1}{Q m} \left(\frac{1}{k_f} \ln \frac{n_0}{n_d} + \frac{l_{3.0}}{l_1} - 1 \right) \quad (8.107)$$

Общее время проветривания длинной тупиковой выработки, когда вентилятор вначале работает на нагнетание, а затем переключается на всасывание, составляет

$$t = t_n + t_{во} = \frac{l_1 S}{Q} \left[\frac{m+2}{m k_f} \ln \frac{n_0}{n_d} + \frac{2}{m} \left(\frac{l_{3.0}}{l_1} - 1 \right) \right] \quad (8.108)$$

Уравнения (8.107) и (8.108) справедливы для выработок, длина которых

$$L \geq l_{3.0} + l_1 \ln(n_0/n_d)/k_f \quad (8.109)$$

Если длина проветриваемой выработки не отвечает условию (8.109), время работы вентилятора на всасывание составит

$$t_{во} = 2 S l_1 (L/l_1 - 1)/(Q m) \quad (8.110)$$

за общее время проветривания

$$t = \frac{l_1 S}{Q} \left[\frac{1}{k_l} \ln \frac{n_0}{n_d} + \frac{2}{m} \left(\frac{L}{l_1} - 1 \right) \right] \quad (8.111)$$

Всасывание-нагнетание-всасывание. При этом варианте реверсивного проветривания вентилятор вначале работает на всасывание до очищения от газов выработки на участке от границы зоны отброса до конца вентиляционных труб, затем переключается на нагнетание. После снижения концентрации газов в призабойной зоне до допустимого уровня вентилятор вновь переключается на всасывание до окончательного проветривания выработки.

Продолжительность первого всасывающего режима

$$t_{вс1} = (l_{в.о} - l_1) S / (Qm) \quad (8.112)$$

Время работы вентилятора на нагнетание

$$t_{н} = \frac{l_1 S}{k_l Q} \ln \frac{n_0}{n_d} \quad (8.113)$$

За время работы вентилятора на нагнетание в призабойной зоне концентрация газа снизится до ПДК. Одновременно произойдет загрязнение некоторого участка выработки, расположенного за выходным отверстием вентиляционного трубопровода. Длина этого участка

$$l_2 = (l_1 / k_l) \ln (n_0 / n_d) \quad (8.114)$$

Продолжительность второго всасывающего режима

$$t_{вс2} = \frac{2S l_1}{k_l Q m} \ln \frac{n_0}{n_d} \quad (8.115)$$

Общее время проветривания выработки

$$t = \frac{1}{Qm} \left[(l_{в.о} - l_1) S + (L - l_1) S_{тр} + \frac{m+2}{k_l} l_1 S \ln \frac{n_0}{n_d} \right] \quad (8.116)$$

Нагнетание-всасывание-нагнетание. При этом варианте реверсивного проветривания вентилятор вначале работает на нагнетание до момента снижения концентрации газов в призабойной зоне до допустимого уровня, затем переключается на всасывание. После того, как выработка на участке от границы распространения газов до конца вентиляционного трубопровода очистится от газов, вентилятор вновь переключается на нагнетание до окончательного проветривания выработки.

Продолжительность первого нагнетательного режима

$$t_{н1} = \frac{l_1 S}{k_l Q} \ln \frac{n_0}{n_d} \quad (8.117)$$

Время работы вентилятора на всасывание согласно выше проведенному анализу составит

$$t_{вс} = \frac{l_1 S}{Qm} \left[\frac{1}{k_l} \ln \frac{n_0}{n_d} + \frac{l_{в.о}}{l_1} - 1 \right] \quad (8.118)$$

За время работы вентилятора на всасывающем режиме выработка на участке за концом вентиляционного трубопровода, считая в направлении от забоя, полностью очистится от газов, а на участке между забоем и концом вентиляционного трубопровода концентрация их увеличится до $n'_0 > n_d$.

Найдем концентрацию n'_0 .

При работе вентилятора на всасывание в призабойную зону поступает $k_{вс}Q$ воздуха с содержанием газов $n_{ср}$.

Количество газа, выносимого в призабойную зону за отрезок времени dt , составляет

$$k_{вс}Qn_{ср}dt, \quad (8.119)$$

где $n_{ср}$ — средняя концентрация газов в объеме выработки на участке между концом вентиляционного трубопровода и границей распространения их в конце нагнетательного режима.

Количество газов, выносимых из призабойной зоны за время dt , составляет

$$k_{вс}Qndt. \quad (8.120)$$

Увеличение количества газов в объеме призабойной зоны V за время dt будет равно

$$k_{вс}Q(n_{ср} - n)dt = -V_1dn. \quad (8.121)$$

Решив полученное уравнение относительно t при начальных ($t=0$; $n=n_d$) и граничных ($t=t_{вс}$; $n=n'_0$) условиях, получим

$$t_{вс} = \frac{V_1}{k_{вс}Q} \ln \frac{n_{ср} - n_d}{n_{ср} - n'_0}. \quad (8.122)$$

Если после очищения от газов выработки за концом трубопровода вентилятор продолжает работать на всасывание, то в призабойную зону начинает поступать свежий воздух и содержание газа в ней постепенно снижается. Время снижения концентрации газа с n'_0 до n_d в первом приближении можно принять равным времени увеличения ее от n_d до n'_0 .

В этом случае дифференциальное уравнение проветривания призабойной зоны будет иметь вид

$$k_{вс}Qndt = -V_1dn. \quad (8.123)$$

Решая его при начальных и граничных условиях, получим

$$t_{вс} = \frac{V_1}{k_{вс}Q} \ln \frac{n'_0}{n_d}. \quad (8.124)$$

Из уравнений (8.122) и (8.124) следует, что

$$(n_{ср} - n_d)/(n_{ср} - n'_0) = n'_0/n_d. \quad (8.125)$$

Решая уравнение (8.125) относительно n'_0 , получим

$$n'_0 = n_{ср} - n_d. \quad (8.126)$$

Подставив вместо $n_{ср}$ его значение из (8.105), получим

$$n_0 = \frac{(n_0 - n_d) l_{3,0}/l_1 - (n_d/k_t) \ln(n_0/n_d)}{(1/k_t) \ln(n_0/n_d) - l_{3,0}/l_1 - 1} \quad (8.127)$$

Продолжительность второго нагнетательного режима найдем из выражения (8.95), подставив в него вместо n_0 значение n'_0 .

$$t_{н2} = 0,96 \frac{S}{Q} \sqrt{\frac{l_1 L^3 (n_0/n_d - 1) l_{3,0}/l_1 - (n_d/k_t) \ln(n_0/n_d)}{\rho^2 (1/k_t) \ln(n_0/n_d) + l_{3,0}/l_1 - 1}} \quad (8.128)$$

Выражение (8.128) можно привести к виду

$$t_{н2} = 0,96 \frac{S}{Q} \sqrt{\frac{l_1 L^3}{\rho^2} \frac{k_t n_0}{n_d \ln(n_0/n_d)}} \quad (8.129)$$

При суммировании времени первого нагнетания $t_{н1}$, времени работы вентилятора на всасывание $t_{вс}$, времени очистки трубопровода от газов $t_{тп}$ и времени второго нагнетания $t_{н2}$, получим общее время проветривания

$$t = t_{н1} + t_{вс} + t_{тп} + t_{н2} \quad (8.130)$$

Для подтверждения закономерностей реверсивного способа проветривания, полученных теоретическим путем, были выполнены лабораторные исследования на аэродинамической модели тупиковой выработки с соблюдением условий подобия. Вредные примеси имитировались дымом, получаемым от сжигания отработанной киноленты на нитрооснове. Изменение концентрации вредных примесей регистрировалось по изменению плотности дыма фотоэлектрическим методом [1].

Результаты лабораторных экспериментов приведены на рис. 8.10, на котором показано изменение концентрации вредных примесей в призабойной части тупиковой выработки при варианте «нагнетание-всасывание» при двух значениях расхода воздуха. Аналогичные кривые получены и при других значениях его расхода. При работе вентилятора на нагнетание концентрация вредных примесей в забое постепенно уменьшается, что удовлетворительно описывается уравнением (8.100). Вредные примеси, выносимые из зоны смешения, распространяются по выработке и постепенно ее заполняют. После того, как концентрация их в призабойной зоне снижалась до условного допустимого уровня, вентилятор переключался на всасывание и начиналось проветривание объема выработки, расположенного между концом трубопровода и границей распространения вредных примесей во время нагнетания. Снижение концентрации вредных примесей в этом объеме при экспериментах хорошо описывается уравнение (8.90). В то же время часть загрязненного воздуха с концентрацией, превышающей допустимую, попадала вновь в призабойную зону. Концентрация вредных примесей в ней увеличилась до тех пор, пока не заканчивалось проветривание остальной части выработки. При экспериментах концентрация вредных примесей в призабойной зоне во время работы вентилятора на всасывание возрастала в 3—5 раз.

После того, как в призабойную зону начал поступать свежий воздух, концентрация вредных примесей уменьшалась и через определенное время достигала допустимого уровня. Абсцисса точки первого перегиба кривой соответствует времени работы вентилятора на нагнетание, а ордината — допустимой концентрации вредных примесей. Разность между абсциссами точек перегиба кривой соответствует времени $t_{вс}$ проветривания части выработки от гра-

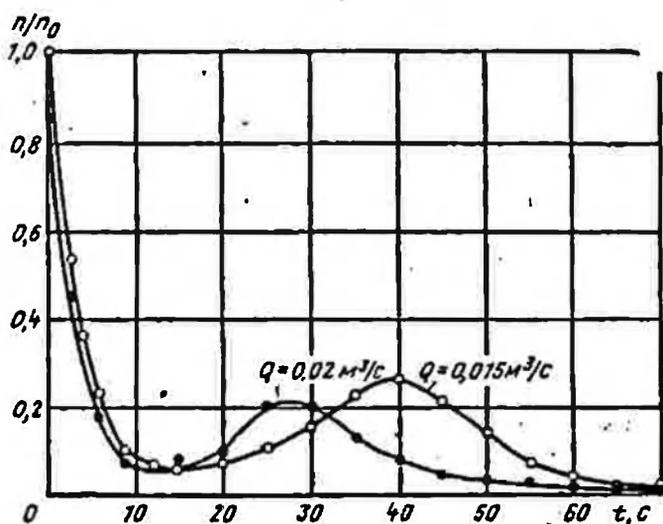


Рис. 8.10. График зависимости относительной концентрации вредных примесей n/n_0 в призабойной части тупиковой выработки от времени проветривания t при варианте «нагнетание-всасывание»

ницы распространения вредных примесей при работе вентилятора на нагнетание до конца вентиляционного трубопровода. Абсцисса точки на последнем участке кривой с ординатой, равной ординате точки первого перегиба, соответствует времени окончания проветривания выработки.

Разность между этой абсциссой и абсциссой точки второго перегиба равна дополнительному времени $t_{вс}$ работы вентилятора на всасывание, необходимому для удаления вредных примесей из призабойной зоны, внесенных в нее за время $t_{вс}$.

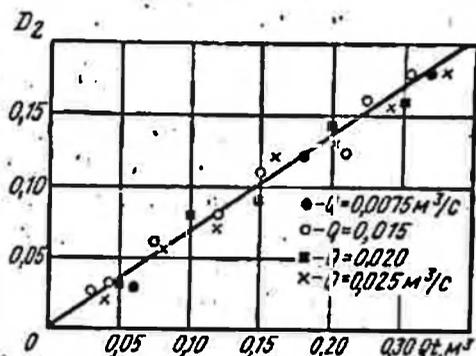
При анализе варианта реверсивного проветривания нагнетание-всасывание было принято, что $t_{вс} = t_{вс}$ (табл. 8.1).

Таблица 8.1

№ опыта	Расчетное время работы вентилятора на всасывание, $t_{вс.р}$, с	Фактическое время работы вентилятора на всасывание, с			$t_{вс.ф}/t_{вс.р}$
		$t'_{вс}$	$t''_{вс}$	$t_{вс.ф} = t'_{вс} + t''_{вс}$	
1	45,6	22	26	48	1,03
2	45,6	23	19	42	0,92
3	34,0	15	15,5	30	0,88
4	34,0	17,5	15,5	33	0,97

На рис. 8.11 приведены результаты наблюдений за изменением концентрации вредных примесей в части выработки, расположенной между границей зоны отброса их во время взрыва и концом вентиляционного трубопровода, во время работы вентилятора в режиме всасывания в координатах Qt и $D_2 = (L_{2.0} - L_1)S - Qt / \left[\ln \left(\frac{n_n}{n_d} \right) \right]$

Рис. 8.11. График зависимости комплексного параметра D_2 от объема поданного в выработку свежего воздуха Qt



Экспериментальные точки образовали прямую, подтверждающую справедливость уравнения (8.90) и правильность выводов, сделанных на основании этого уравнения. Тангенс угла наклона прямой равен коэффициенту m , характеризующему неполноту выноса вредных примесей из вышеуказанной части тупиковой выработки при однократном обмене воздуха в ней. Для условий экспериментов $m=0,67$. Значение коэффициента m , полученное по результатам производственных экспериментов, колеблется от 0,5 до 0,7.

Сравнительная оценка различных вариантов и область применения реверсивного проветривания. Время проветривания при варианте «всасывание-нагнетание», если длина выработки $L < 450A/S$, определяется по формуле (8.98), а при $L > 450A/S$ — по формуле (8.99). При варианте «всасывание-нагнетание — всасывание» время проветривания, независимо от длины выработки, определяется по формуле (8.116).

При анализе этих зависимостей установлено, что при длине выработки, превышающей величину, определяемую по формуле

$$L = 1,06 l_p \sqrt{[(m + 2)/(mk_i)]^3}, \quad (8.131)$$

эффективнее вариант реверсивного проветривания «всасывание-нагнетание-всасывание» при меньшей длине — вариант «всасывание-нагнетание».

Расстояние от вентиляционных труб до забоя i , в соответствии с ПБ не должно превышать 10 м, среднее значение m по результатам производственных исследований составляет 0,6, величина коэффициента турбулентной диффузии k_i в практических условиях в среднем составляет также 0,6. Коэффициент потерь воздуха прием равным 1. Подставив эти значения в формулу (8.131), найдем, что при длине выработки до 200 м эффективнее вариант ре-

версивного проветривания «всасывание-нагнетание», при большой длине — вариант «всасывание-нагнетание-всасывание».

Сравним теперь время проветривания выработки при вариантах «всасывание-нагнетание-всасывание» и «нагнетание-всасывание-нагнетание». Приравняв правые части выражений (8.116) и (8.130) и, решив полученное уравнение относительно L с учетом (8.93), (8.117), (8.118) и (8.129), найдем длину выработки, при которой время проветривания при обоих вариантах будет одинаковым,

$$L = (l_1 \rho / k_i) \sqrt{(1/\pi^3) \ln(n_0/n_d)} . \quad (8.132)$$

Расчеты, выполненные по формуле (8.132), показывают, что при длине выработки более 80—100 м третий вариант реверсивного проветривания эффективнее четвертого.

Сравнивая время проветривания выработки при вариантах «нагнетание-всасывание» и «всасывание-нагнетание-всасывание», найдем, что при длине выработки, превышающей значение, определяемое из выражения

$$L = l_1 + S(l_{2.0} - l_1)/S_{\text{гд}}, \quad (8.133)$$

эффективнее вариант «нагнетание-всасывание», а при меньшей длине — вариант «всасывание-нагнетание-всасывание».

Сопоставление варианта «всасывание-нагнетание-всасывание» с нагнетательным проветриванием показывает, что практически при любой длине выработки время проветривания при реверсивном способе меньше, чем при нагнетательном.

Приведенный анализ показывает, что эффективность проветривания тупиковой выработки после взрывных работ при одном воздуховоде может быть повышена за счет чередования нагнетательного и всасывающего режимов работы вентилятора. При длине выработки, не превышающей значения, определяемого из выражения (8.131), наиболее эффективным является вариант реверсивного проветривания «всасывание-нагнетание»; если длина выработки больше значения, определяемого из выражения (8.131), но меньше значения определяемого из выражения (8.133) — вариант «всасывание-нагнетание-всасывание»; при длине выработки, превышающей значение, определяемой из выражения (8.133), — вариант «нагнетание-всасывание». Многократное реверсирование вентиляционной струи (число реверсов больше двух) менее выгодно, чем указанные варианты.

8.4. Повышение эффективности комбинированного способа проветривания

Наиболее распространенный вариант комбинированного способа проветривания с использованием двух вентиляторов, один из которых (всасывающий) установлен на свежей струе воздуха в основной выработке, другой (нагнетательный) — в проветриваемой выработке, показан на рис. 8.12.

Для устранения рециркуляции загрязненного воздуха через нагнетательный трубопровод его количество, поступающее во всасывающий трубопровод, принимают на 20—30 % больше производительности нагнетательного вентилятора. Нагнетательный вентилятор располагают за пределами зоны отброса взрывных газов и пыли на расстоянии не менее 15—20 м от конца всасывающего трубопровода. Расстояние от нагнетательного трубопровода до забоя согласно ПБ должно быть не более 10 м.

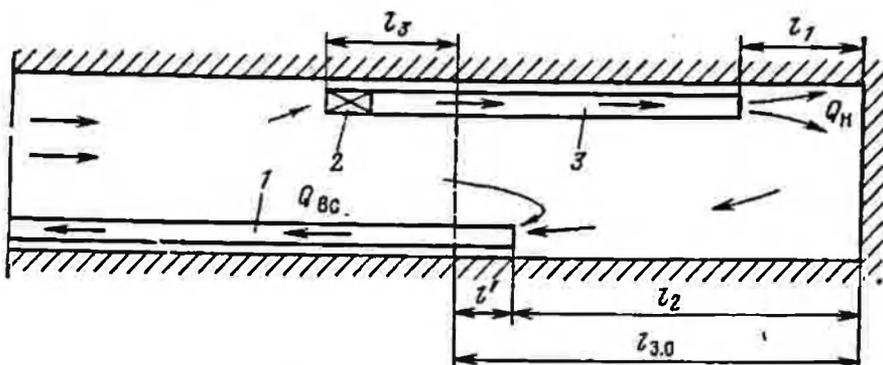


Рис. 8.12. Схема комбинированного проветривания тупиковой выработки двумя вентиляторами:
1 — всасывающий трубопровод; 2 — нагнетательный вентилятор; 3 — нагнетательный трубопровод

Указанные рекомендации недостаточно обоснованы. В связи с этим рассмотрим процесс проветривания тупиковой выработки применительно к схеме, приведенной на рис. 8.12.

Для упрощения математической формулировки задачи сделаем следующие допущения:

1. Концентрация вредных примесей равномерно распределена в зоне отброса их после взрыва заряда ВВ.

2. Проветривание призабойной части выработки осуществляется за счет действия свободной струи, создаваемой нагнетательным вентилятором.

3. Всос нагнетательного вентилятора расположен вблизи зоны отброса газов и пыли, поэтому время перемещения газов на участке l_3 при возникновении рециркуляции незначительно.

4. Время перемещения вредных примесей по трубопроводу не влияет на процесс проветривания.

При рассматриваемом способе проветривания возможны следующие варианты: $Q_n > Q_{вс}$, $Q_n = Q_{вс}$ и $Q_n < Q_{вс}$ (здесь Q_n — количество воздуха, поступающего в забой по нагнетательному трубопроводу, $м^3/с$; $Q_{вс}$ — количество воздуха, поступающего во всасывающий трубопровод, $м^3/с$).

В первом варианте в нагнетательный трубопровод будет поступать часть загрязненного воздуха. При этом коэффициент рециркуляции загрязненного воздуха

$$\varepsilon = Q_n / Q_n \quad (8.134)$$

где Q_p — количество загрязненного воздуха, поступающего во всас нагнетательного вентилятора.

Так как

$$Q_{вс} = Q_n - Q_p, \quad (8.135)$$

то с учетом (8.134)

$$Q_{вс} = Q_n (1 - \epsilon). \quad (8.136)$$

Количество вредных примесей, выносимых из загазованной зоны за время dt ,

$$q_1 = Q_n k_t n dt + Q_n (1 - k_t) n' dt. \quad (8.137)$$

где k_t — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи; n — концентрация вредных примесей в проветриваемом объеме в любой момент времени t , мг/м³; n' — начальная концентрация вредных примесей в свежем воздухе, поступающем для проветривания, мг/м³.

Количество вредных примесей, поступающих в призабойную зону за время dt ,

$$q_2 = Q_n n'' dt, \quad (8.138)$$

где n'' — концентрация вредных примесей в воздухе, поступающем в забой, мг/м³.

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс проветривания, с учетом (8.137) и (8.138) будет иметь вид

$$\frac{dn}{dt} + \frac{Q_n k_t (n - n'')}{V} = 0, \quad (8.139)$$

где V — проветриваемый объем, м³.

При средней концентрации вредных примесей n содержание их в исходящей из проветриваемого объема струе

$$n_{всх} = n [k_t + (1 - k_t) n' / n]. \quad (8.140)$$

Воздух, исходящий из проветриваемого объема, частично удаляется через всасывающий воздуховод, а частично попадает во всас нагнетательного трубопровода. Концентрация вредных примесей во всасе нагнетательного вентилятора может быть определена из соотношения

$$n'' = [Q_p n_{всх} + (Q_n - Q_p) n'] / Q_n. \quad (8.141)$$

С учетом (8.140)

$$n'' = [k_t \epsilon n + (1 - \epsilon) n'] / [1 - (1 - k_t) \epsilon]. \quad (8.142)$$

Подставив полученное значение n'' в уравнение (8.139), после преобразований получим дифференциальное уравнение, описывающее процесс проветривания выработки при взрывных работах при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через нагнетательный трубопровод

$$\frac{dn}{dt} + \frac{Q_n}{V} \frac{k_t (1 - \epsilon)}{1 - (1 - k_t) \epsilon} (n - n') = 0. \quad (8.143)$$

Проинтегрировав уравнение (8.143), получим

$$n = n' + (n_0 - n') \exp \left[- \frac{k_t Q_{\text{н}} t}{V} \frac{1 - \varepsilon}{1 - (1 - k_t) \varepsilon} \right], \quad (8.144)$$

где n_0 — начальное содержание вредных примесей в выработке после взрыва ВВ, мг/м³.

Решив уравнение (8.144) относительно t при $n = n_d$, найдем время проветривания выработки,

$$t = V [1 - (1 - k_t) \varepsilon] \ln [(n_0 - n') / (n_d - n')] / [Q_{\text{н}} k_t (1 - \varepsilon)]. \quad (8.145)$$

Рассмотренный случай справедлив при условии, когда всас нагнетательного вентилятора находится вблизи зоны отброса газов и пыли.

При увеличении длины нагнетательного трубопровода значение l_3 будет возрастать. Тогда за счет рециркуляции газовой смеси в количестве $Q_{\text{н}} \varepsilon$ будет загрязнять дополнительный объем выработки. Время проветривания увеличится на величину

$$t_p = l_3 S / (Q_{\text{н}} \varepsilon), \quad (8.146)$$

где S — поперечное сечение выработки, м².

При большом значении l_3 процесс проветривания загрязненной взрывом зоны может стать циклическим и продолжаться длительное время. Выработка сначала будет проветриваться чистым воздухом. При подходе газовой волны через время t_p к всасу нагнетательного вентилятора загрязненный воздух по нагнетательному воздухопроводу вновь будет поступать в призабойную часть. При некоторых значениях l_3 и ε возможно, что призабойная часть проветрится до ПДК еще до подхода газовой волны к всасу вентилятора, а затем произойдет повторное загрязнение выработки, т. е. процесс проветривания будет повторяться.

Из вышесказанного следует, что в тех случаях, когда $Q_{\text{н}} > Q_{\text{вс}}$, целесообразнее применять нагнетательный трубопровод небольшой длины.

При втором варианте коэффициент рециркуляции равен нулю, время проветривания выработки после взрыва заряда ВВ

$$t = t' + \frac{l_2 S}{Q_{\text{н}} k_t} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'}, \quad (8.147)$$

где t' — время проветривания участка выработки, ограниченного плоскостью, проходящей через конец всасывающего трубопровода, и границей зоны отброса газов и пыли, с; l_2 — расстояние от забоя до всасывающего трубопровода, м.

Выработка на участке $l' = l_{30} - l_2$ (l_{30} — длина зоны отброса газов и пыли, м) проветриваться практически не будет, так как расход воздуха на этом участке равен нулю. Снижение концентрации вредных примесей в нем будет происходить главным образом за счет молекулярной диффузии. Время t' будет значительным.

Этот вариант нежелателен, в практике не применяется, поэтому в дальнейшем не рассматривается.

При третьем варианте участок l_2 проветривается свободной турбулентной струей, исходящей из нагнетательного трубопровода, а участок l' — свежим воздухом.

Время проветривания участка l_2

$$t_2 = \frac{l_2 S}{Q_{\text{в}} k_t} \ln \frac{n_0 - n'}{n_d - n'} \quad (8.148)$$

Участок l' проветривается по всасывающему способу. Время проветривания его найдем, решив уравнение (8.90) относительно l при $n = n_d$ и $Q = Q_{\text{вс}} - Q_{\text{в}}$.

$$l' = (l_{3.0} - l_2) S \Lambda (Q_{\text{вс}} - Q_{\text{в}}) (m + 1/B), \quad (8.149)$$

где m — коэффициент неполноты выноса вредных примесей из проветриваемого объема при однократном обмене воздуха в нем. Согласно вышеприведенным исследованиям $m = 0,5 \div 0,7$;

$$B = \ln [(n_0 - n') / (n_d - n')]. \quad (8.150)$$

Наиболее выгодным будет такой вентиляционный режим, при котором проветривание участков l_2 и l' заканчивается одновременно, т. е. когда

$$l' = t_2. \quad (8.151)$$

Подставляя в равенство (8.151) значения l' и t_2 из (8.148) и (8.149), после некоторых преобразований найдем оптимальный расход воздуха во всасывающем трубопроводе

$$Q_{\text{вс}} = Q_{\text{в}} \left(\frac{(l_{3.0}/l_2 - 1) k_t}{(mB + 1)} + 1 \right). \quad (8.152)$$

Как видно из уравнения (8.152), соотношение между $Q_{\text{вс}}$ и $Q_{\text{в}}$ зависит от взаимного расположения и удаления от забоя всасывающего и нагнетательного трубопроводов.

Полное время проветривания при соблюдении условия (8.151)

$$t = l' = t_2. \quad (8.153)$$

Решив уравнение (8.152) относительно l_2 , найдем оптимальное расстояние от забоя до всасывающего трубопровода при известных значениях $Q_{\text{вс}}$ и $Q_{\text{в}}$

$$l_2 = \frac{k_t l_{3.0}}{(Q_{\text{вс}}/Q_{\text{в}} - 1)(mB + 1) + k_t}. \quad (8.154)$$

Как отмечалось выше, значение k_t составляет в среднем 0,6. Значение $Q_{\text{вс}}/Q_{\text{в}}$ при прямоточном проветривании принимают равным 1,3. Среднее значение m составляет 0,6, а значение B изменяется от 4,3 до 5,0. Подставив эти значения в уравнение (8.154), найдем, что оптимальное расстояние всасывающего трубопровода от забоя составляет (0,15—0,65) $l_{3.0}$.

При средних значениях k_t , m и B минимальное время проветривания будет при $l_2 = 0,35 l_{3.0}$.

Если выдерживаются условия (8.153) и (8.154), то время прямооточного проветривания выработки после взрыва ВВ при рекомендуемом значении $Q_{вс}/Q_{п}=1,3$

$$t_{п} = 1,3 l_{з.о} S B / \{ [0,3 (mB + 1) + k_t] Q_{вс} k_t \}. \quad (8.155)$$

Исходя из выражений (8.136) и (8.145), время проветривания выработки при наличии рециркуляции

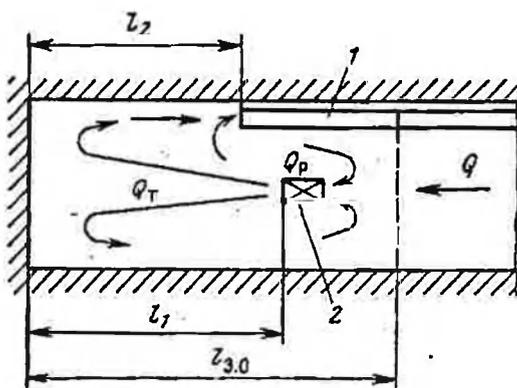
$$t_{п} = (l_{з.о} + l_3) S [1 - (1 - k_t) \varepsilon] B / (Q_{вс} k_t). \quad (8.156)$$

Из уравнений (8.155) и (8.156) следует, что при одинаковых расходах свежего воздуха на проветривание отношение

$$\frac{t_{п}}{t_{п}} = 0,77 (1 + l_3/l_{з.о}) [1 - (1 - k_t) \varepsilon] [0,3 (mB + 1) + k_t]. \quad (8.157)$$

Рис. 8.13. Схема комбинированного способа проветривания тупиковой выработки с применением вентилятора-турбулизатора:

1 — всасывающий трубопровод; 2 — вентилятор-турбулизатор



Расчеты, выполненные по уравнению (8.157) при $l_3=0$ и $\varepsilon \rightarrow 1$ (наиболее выгодный с точки зрения времени проветривания вариант рециркуляционного проветривания) и вышеуказанных крайних значениях k_t , m и B , показали, что $t_{п}/t_{п}$ изменяется от 1,06 до 1,6, т. е. при одинаковых расходах воздуха на проветривание и соблюдении условий (8.153) и (8.154) прямооточная схема проветривания всегда эффективнее рециркуляционной.

Однако при уменьшении длины нагнетательного трубопровода и расположений нагнетательного вентилятора и всасывающего трубопровода вблизи забоя рециркуляционная схема может быть более эффективной.

Проветривание тупиковой выработки комбинированным способом при отсутствии трубопровода у нагнетательного вентилятора, который называется вентилятором-турбулизатором, показано на рис. 8.13.

Вентилятор-турбулизатор устанавливается в призабойной части выработки и обеспечивает ее эффективное проветривание. Вредные примеси удаляются из выработки по трубопроводу, не загрязняя ее атмосферу на всем протяжении. Имея все достоинства комбинированного проветривания, рассматриваемый способ позволяет

ограничиться одним ставом вентиляционных труб, что значительно повышает его практическую ценность.

Вместе с тем возникновение рециркуляционных потоков при работе вентилятора-турбулизатора может значительно снизить эффективность его работы, а при определенных условиях сделать ее и бесполезной. Поэтому необходимым условием практического использования вентиляторов-турбулизаторов являются рациональное расположение и оптимальные режимы работы вентиляционного оборудования.

Установлено, что с точки зрения возможности возникновения рециркуляции и влияния ее на эффективность проветривания можно выделить следующие три варианта взаимного расположения приемного отверстия всасывающего трубопровода и вентилятора-турбулизатора:

$$l_1 < l_2 - \sqrt{S}; \quad l_1 > l_2 + \sqrt{S} \quad \text{и} \quad l_2 - \sqrt{S} < l_1 \leq l_2 + \sqrt{S}$$

(l_1 и l_2 — соответственно расстояния от забоя до всаса вентилятора-турбулизатора и приемного отверстия всасывающего трубопровода, м; S — площадь поперечного сечения выработки, м²).

При первом варианте вентилятор-турбулизатор, независимо от его производительности, полностью работает на рециркуляцию. Свежий воздух поступает во всасывающий трубопровод, практически не участвуя в проветривании призабойной зоны.

При втором варианте рециркуляция возникает только в том случае, если производительность вентилятора-турбулизатора Q_T превышает расход свежего воздуха, поступающего по выработке в призабойную зону Q ($Q_T > Q$). Однако при этом весь свежий воздух, поступающий по выработке, участвует в проветривании призабойной зоны. Если $Q_T \leq Q$, рециркуляция загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор отсутствует.

При третьем варианте рециркуляция загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор имеет место и при $Q_T \leq Q$. При этом количество свежего воздуха, поступающего в забой, уменьшается, что отрицательно сказывается на эффективности его проветривания.

Из сказанного выше следует, что вентилятор-турбулизатор должен располагаться не менее чем на \sqrt{S} дальше от забоя, чем приемное отверстие всасывающего трубопровода. Приемное отверстие всасывающего трубопровода в соответствии с ПБ должно располагаться на расстоянии не более 10 м от забоя.

Изменение средней концентрации вредных примесей (мг/с) в призабойной части выработки, в которую они поступают с интенсивностью F , при наличии рециркуляции части загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dn}{dt} = \frac{F}{V} - \frac{Q(n-n')}{V} - \frac{k_f}{1-\varepsilon(1-k_T)} \quad (8.158)$$

где V — объем выработки от забоя до вентилятора-турбулизатора, м^3 ; k_t — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи, создаваемой вентилятором-турбулизатором; n' — содержание вредных примесей в свежем воздухе, поступающем в проветриваемый объем, $\text{мг}/\text{м}^3$; n — средняя концентрация вредных примесей в объеме V в любой момент времени t , $\text{мг}/\text{м}^3$; ε — коэффициент рециркуляции.

$$\varepsilon = (\dot{Q}_r - \dot{Q}) / \dot{Q}_r \quad (8.159)$$

Решая уравнение (8.158) относительно n , получим

$$n = n' + \frac{1 - \varepsilon(1 - k_t)}{k_t} \frac{F}{Q} + \left(n_0 - n' - \frac{1 - \varepsilon(1 - k_t)}{k_t} \frac{F}{Q} \right) \exp \times \\ \times \left(- \frac{k_t}{1 - \varepsilon(1 - k_t)} \frac{Qt}{V} \right) \quad (8.160)$$

где n_0 — концентрация вредных примесей в проветриваемом объеме в начале проветривания, $\text{мг}/\text{м}^3$; t — время проветривания, с.

Полученное уравнение (8.160) позволяет проанализировать влияние рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор на эффективность проветривания выработки при взрывных работах, непрерывных выделениях газов и пыли в забое.

Взрывные работы. С точки зрения закономерности снижения концентрации вредных примесей при проветривании выработки после взрыва ВВ в ней можно выделить два участка.

Вначале освобождается от вредных примесей участок выработки от границы зоны отброса газов и пыли до вентилятора-турбулизатора. Проветривание его происходит за счет разрежения, создаваемого всасывающим вентилятором. Влиянием вентилятора-турбулизатора на проветривание этого участка можно пренебречь. Время его проветривания

$$t' = (l_{3.0} - l_1) S / \left[Q \left(m + \frac{1}{B} \right) \right] \quad (8.161)$$

По истечении времени t' начинается проветривание участка выработки, расположенного между забоем и вентилятором-турбулизатором. Проветривание его осуществляется за счет свободной струи, создаваемой вентилятором-турбулизатором.

Решив уравнение (8.154) относительно t при $F=0$ и $n=n_d$ (n_d — допустимое содержание вредных примесей, при котором разрешается допуск рабочих в забой после взрывных работ, $\text{мг}/\text{м}^3$), найдем время проветривания призабойной зоны выработки при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор

$$t_p = \frac{V}{Q} \frac{1 - \varepsilon(1 - k_t)}{k_t} B \quad (8.162)$$

При прямом проветривании без рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор, когда $\dot{Q}_r \leq \dot{Q}$, время,

необходимое для снижения концентрации вредных примесей в объеме V до допустимой,

$$i_n = VB/(\beta k_t Q), \quad (8.163)$$

где $\beta = Q_r/Q \leq 1$.

При одинаковом расходе свежего воздуха на проветривание

$$i_p/i_n = \beta [1 - \varepsilon (1 - k_t)]. \quad (8.164)$$

Так как $\beta \leq 1$ и $k_t < 1$, выражение (8.164) меньше 1, т. е. рециркуляция загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор позволяет сократить время проветривания призабойной части выработки. Причем при увеличении рециркуляции, если расход свежего воздуха не уменьшается, эффективность проветривания возрастает.

Наибольший эффект, который может быть достигнут за счет рециркуляции, определяется предельным значением зависимости (8.164) при $\varepsilon \rightarrow 1$

$$i_p/i_n = \beta k_t. \quad (8.165)$$

В практических условиях значение k_t изменяется от 0,2 до 0,9. Значение β принимают равным 0,75 — 0,85. Подставив крайние значения k_t и β в выражение (8.165), найдем, что за счет рециркуляции время проветривания призабойной части выработки может быть сокращено в 1,3—6,7 раза.

Время проветривания выработки на участке $(l_{2,0} - l_1)$, если расход свежего воздуха постоянный, от рециркуляции не зависит.

Выразив V через l_1 и S и сложив правые части выражений (8.161) и (8.162), определим общее время проветривания выработки после взрыва ВВ при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор

$$i_p = \frac{l_1 S B}{Q} \left[\frac{l_{2,0}/l_1 - 1}{mB + 1} + \frac{1 - \varepsilon (1 - k_t)}{k_t} \right]. \quad (8.166)$$

Общее время прямоочного проветривания выработки после взрыва ВВ

$$i_n = \frac{l_1 S B}{Q} \left(\frac{l_{2,0}/l_1 - 1}{mB + 1} + \frac{1}{\beta k_t} \right). \quad (8.167)$$

Из выражений (8.166) и (8.167) видно, что чем меньше l_1 , тем меньше общее время проветривания выработки. Следовательно, вентилятор-турбулизатор и всасывающий трубопровод целесообразно помещать по возможности вблизи забоя.

Непрерывные газовыделения. При $t \rightarrow \infty$ уравнение (8.160) описывает процесс проветривания призабойной зоны при непрерывных газовыделениях (выделение выхлопных газов при работе двигателей внутреннего сгорания, выделение природных газов в забое и т. п.).

$$n = n' + F [1 - \varepsilon (1 - k_t)] / (k_t Q). \quad (8.168)$$

Решив уравнение (8.168) относительно \bar{Q} при $n=n_d$, получим выражение для определения расхода свежего воздуха, необходимого для проветривания выработки при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор,

$$Q_p = F \frac{1 - \varepsilon(1 - k_t)}{k_t(n_d - n')} \quad (8.169)$$

При прямооточном проветривании

$$Q_{\Pi} = F / [\beta k_t (n_d - n')] \quad (8.170)$$

Из выражений (8.169) и (8.170) следует

$$Q_p / Q_{\Pi} = \beta [1 - \varepsilon(1 - k_t)] \quad (8.171)$$

Так как правые части выражений (8.164) и (8.171) равны между собой, все сказанное выше в отношении эффективности проветривания за счет рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор при взрывных работах справедливо и при непрерывных газовыделениях.

Непрерывные пылевыведения. Интенсивность непрерывных пылевыведений в отличие от интенсивности газовыведений, не является постоянной величиной и зависит от параметров свободной струи. Эта зависимость выражается уравнением (2.42).

С учетом выражений (2.42) и (7.22) зависимость между интенсивностью непрерывного источника пылевыведения в забое F (мг/с) и производительностью вентилятора-турбулизатора Q_T можно выразить уравнением

$$F = F_0 (1 + \varphi' Q_T^2), \quad (8.172)$$

где F_0 — интенсивность пылевыведения при отсутствии проветривания, мг/с; φ' — коэффициент, характеризующий приращение интенсивности пылевыведения, зависящий от параметров свободной струи, создаваемой вентилятором-турбулизатором, $\text{с}^2/\text{м}^6$.

$$\varphi' = 1,08 \psi L_1 / (2a l_1 d + 0,417 d^2)^2, \quad (8.173)$$

где d — диаметр выходного отверстия вентилятора-турбулизатора, м.

Подставив значение F из (8.172) в (8.168), предварительно выразив значение Q_T через Q и ε , получим уравнение проветривания тупиковой выработки при непрерывных пылевыведениях при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор

$$n_p = n' + \frac{F_0}{Q} \frac{1 - \varepsilon(1 - k_t)}{k_t} \left[1 + \frac{\varphi' Q^2}{(1 - \varepsilon)^2} \right] \quad (8.174)$$

Анализ уравнения (8.174) и производственные наблюдения (см. рис. 8.14) показывают, что рециркуляция воздуха через вентилятор-турбулизатор при непрерывных пылевыведениях приводит к увеличению запыленности в забое. Лишь при небольших расходах воздуха $Q < \sqrt{\frac{1}{\varphi'} \frac{1 - k_t}{1 + k_t}}$ за счет рециркуляции достигается незначительный эффект.

Если очистка воздуха от пыли не производится, проветривание должно осуществляться без рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор. Для этого должны быть соблюдены следующие условия: $l_1 \geq l_2 + \sqrt{S}$; $Q_T < Q$. При этом процесс проветривания описывается уравнением

$$n = n' + F_0 (1 + \varphi' Q_T^2) / (k_t Q_T). \quad (8.175)$$

Приравняв первую производную функции (8.175) по Q_T нулю, найдем, что минимальная запыленность воздуха в забое обеспечивается при производительности вентилятора-турбулизатора

$$Q_T = 1/\sqrt{\varphi'}. \quad (8.176)$$

Подставив значение Q_T из уравнения (8.176) в (8.175), определим минимальную запыленность, которая может быть достигнута в забое при рассматриваемом способе проветривания,

$$n_{\min} = 2F_0 \sqrt{\varphi'} / k_t + n'. \quad (8.177)$$

При $n_{\min} < n_d$ существует область значений Q_T , при которых запыленность воздуха в выработке не будет превышать допустимую. Значения Q_T , ограничивающие эту область, определяют из уравнения (8.175) при $n = n_d$

$$Q_T = \frac{0.5}{\varphi' F_0} \left[k_t (n_d - n') \pm \sqrt{k_t^2 (n_d - n')^2 - 4F_0^2 \varphi'} \right]. \quad (8.178)$$

На производстве не всегда удается исключить рециркуляцию воздуха через вентилятор-турбулизатор. Поэтому большое значение приобретает применение фильтров для поглощения пыли.

Процесс проветривания с использованием вентилятора-турбулизатора, снабженного фильтром для очистки воздуха от пыли, при наличии рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор описывается уравнением вида

$$n_p = \frac{(1-\varepsilon)(1-\eta)}{1-\varepsilon(1-\eta)} n' + \frac{F_0(1-\varepsilon)[1-\varepsilon(1-k_t)(1-\eta)]}{k_t Q [1-\varepsilon(1-\eta)]} \times \left[1 + \frac{\varphi' Q^2}{(1-\varepsilon)^2} \right], \quad (8.179)$$

где n_p — запыленность в забое при наличии рециркуляции воздуха через вентилятор-турбулизатор, мг/м³; η — степень очистки воздуха от пыли в фильтре.

Результаты производственных наблюдений за запыленностью воздуха в призабойной части выработки при наличии на вентиляторе-турбулизаторе фильтра из иглопробивной синтетической ткани и без него при постоянном расходе свежего воздуха Q и разных значениях коэффициента рециркуляции представлены на рис. 8.14. Фактическая запыленность воздуха не отличается от расчетной.

Из уравнения (8.179) следует, что использование фильтров для очистки воздуха от пыли при $n' = 0$ позволяет снизить запылен-

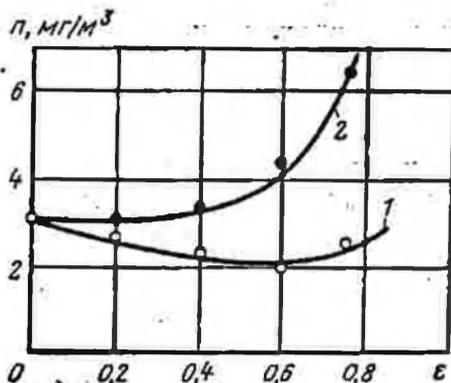
ность в $[1 - (1 - \eta)\epsilon][1 - (1 - k_t)\epsilon] / \{(1 - \epsilon)[1 - (1 - k_t)(1 - \eta)\epsilon]\}$ раз. При значениях $k_t = 0,6$, $\eta = 0,85 \div 0,95$ и коэффициенте рециркуляции $\epsilon = 0,5$, при применении фильтра запыленность воздуха уменьшается в 1,5 раза.

При $\epsilon = 0$, уравнение (8.179) описывает процесс прямоточного проветривания забоя при $Q_r = Q$ (наилучший с точки зрения использования воздуха вариант прямоточного проветривания)

$$n_{\text{п}} = n' + F_0(1 + \varphi'Q^2)/(k_t Q), \quad (8.180)$$

Рис. 8.14. График зависимости запыленности воздуха n от коэффициента рециркуляции ϵ при бурении шпуров двумя перфораторами:

1 и 2 — соответственно при наличии и отсутствии фильтра на вентиляторе-турбулизаторе



где $n_{\text{п}}$ — запыленность воздуха в забое при прямоточном проветривании, мг/м^3 .

При одинаковых расходах свежего воздуха на проветривание и $n' = 0$

$$\frac{n_p}{n_{\text{п}}} = \frac{1 + \varphi'Q^2(1 - \epsilon)^{-2}}{1 + \varphi'Q^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon)[1 - \epsilon(1 - k_t)(1 - \eta)]}{1 - \epsilon(1 - \eta)}. \quad (8.181)$$

Анализ зависимости (8.181) показывает, что при расходах свежего воздуха

$$Q < \sqrt{\frac{1}{\varphi'} \frac{1 - k_t(1 - \eta)}{1 + k_t(1 - \eta)}} \quad (8.182)$$

существует область значений коэффициента рециркуляции ϵ , при которых $n_p/n_{\text{п}} < 1$. Решив уравнение (8.181) относительно ϵ при $n_p/n_{\text{п}} = 1$, найдем, что при расходах свежего воздуха Q , отвечающих условию (8.182), запыленность в проветриваемой выработке при рециркуляции загрязненного воздуха через вентилятор-турбулизатор не будет превышать запыленность при проветривании без рециркуляции, если

$$\bar{\epsilon} \leq 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{0,25}{B_1} \left[\eta \left(\frac{1}{\varphi'Q^2} - 1 \right) - 1 \right]^2 + \frac{1}{\varphi'Q^2} \left(\frac{1}{B_1} - 1 \right) + \frac{0,5}{B_1} \left[\eta \left(\frac{1}{\varphi'Q^2} + 1 \right) - 1 \right]}}, \quad (8.183)$$

где

$$B_1 = k_t + \eta(1 - k_t). \quad (8.184)$$

Если расход свежего воздуха постоянный и отвечает условию (8.182), то при увеличении коэффициента рециркуляции запыленность в проветриваемой выработке вначале уменьшается, затем, достигнув минимального значения, начинает возрастать. Значение коэффициента рециркуляции, соответствующего минимальной запыленности, является оптимальным. При степени очистки воздуха от пыли в фильтре $\eta = 0,85 \div 0,95$ оптимальное значение коэффициента рециркуляции

$$\varepsilon_{\text{опт}} \approx 1 - Q\sqrt{\varphi'}. \quad (8.185)$$

Принимать значение коэффициента рециркуляции больше его значения, определяемого из выражения (8.185), нецелесообразно. Производительность вентилятора, соответствующую минимальной запыленности, определяют по формуле (8.176).

Минимальная запыленность, получаемая при рециркуляционном проветривании при наличии фильтра на вентиляторе-турбулизаторе,

$$n_{\text{pmin}} = \frac{(1-\eta)Q\sqrt{\varphi'}}{(1-\eta)Q\sqrt{\varphi'} + \eta} n' + \frac{2F_0\sqrt{\varphi'}}{k_t} \times \\ \times \frac{1 - (1 - Q\sqrt{\varphi'})(1-\eta)(1-k_t)}{1 - (1 - Q\sqrt{\varphi'})(1-\eta)}. \quad (8.186)$$

С энергетической точки зрения применять вентиляторы-турбулизаторы целесообразно при одинаковых расходах воздуха и меньших или равных энергетических затратах сокращается время проветривания выработки (взрывные работы) или когда допустимое содержание вредных примесей в забое достигается при меньших затратах энергии на проветривание (бурение, скреперование, погрузка руды и т. п.).

Расход энергии в единицу времени на проветривание выработки: с применением вентилятора-турбулизатора W_T и расход энергии на проветривание выработки комбинированным (нагнетатель-по-всасывающим) способом W_K можно записать в виде

$$W_T = R_1 Q_T^3 + R_2 Q^3; \quad (8.187)$$

$$W_K = R_3 Q_K^3 + R_2 Q_{\text{вс}}^3, \quad (8.188)$$

где \bar{R}_1 — сопротивление вентилятора-турбулизатора, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; R_2 — сопротивление всасывающего трубопровода, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; R_3 — сопротивление нагнетательного трубопровода, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; Q_T — производительность вентилятора-турбулизатора, $\text{м}^3/\text{с}$; Q — расход свежего воздуха при всасывающем способе с использованием вентилятора-турбулизатора, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_K — количество воздуха, поступающего по нагнетательному трубопроводу при комбинированной схеме про-

ветривания, м³/с; $Q_{вс}$ — расход свежего воздуха при комбинированной схеме проветривания, м³/с.

Выразим величины Q_T и Q_H , входящие в выражения (8.187) и (8.188), через расход свежего воздуха.

При проветривании с использованием вентилятора-турбулизатора расход свежего воздуха определяют из уравнения

$$Q_T = Q/(1 - \epsilon). \quad (8.189)$$

При комбинированном способе проветривания расход свежего воздуха, как указывалось выше, должен быть на 30 % больше производительности нагнетательного трубопровода

$$Q_H = Q_{вс}/1,3. \quad (8.190)$$

Подставив значения Q_T и Q_H в уравнения (8.187) и (8.188), получим

$$W_T = Q^3 \left[\frac{R_1}{(1 - \epsilon)^3} + R_2 \right]; \quad (8.191)$$

$$W_H = Q_{вс}^3 \left(\frac{R_3}{1,3^3} + R_2 \right). \quad (8.192)$$

Разделив уравнение (8.191) на (8.192), получим

$$\frac{W_T}{W_H} = \left(\frac{Q}{Q_{вс}} \right)^3 \left[\frac{R_1/(1 - \epsilon)^3 + R_2}{0,455R_3 + R_2} \right]. \quad (8.193)$$

При комбинированном способе проветривания длина нагнетательного трубопровода колеблется в пределах 70—130 м, составляя в среднем 100 м. Сопротивление прорезиненного трубопровода такой длины при диаметре труб 0,4 м равно 300 Н·с²/м³ [10].

Сопротивление вентилятора-турбулизатора R_1 равно сумме сопротивлений на входе и на выходе из вентилятора

$$R_1 = R_{вх} + R_{вых}. \quad (8.194)$$

Так как сопротивление на входе в обычный трубопровод равно сопротивлению на выходе из него, то и сопротивление на входе в вентилятор, установленный без диффузора, равно сопротивлению на выходе из вентилятора. Расчет $R_{вх}$ и $R_{вых}$ производят по формуле

$$R_{вх} = R_{вых} = \frac{\rho, \epsilon_1}{S_1^2} \xi_{вн.р} \approx \frac{\rho}{a_1^4} \xi_{вн.р}, \quad (8.195)$$

где S_1 , a_1 — соответственно площадь поперечного сечения (м²) и диаметр выходного отверстия вентилятора-турбулизатора (м); $\xi_{вн.р}$ — коэффициент местного сопротивления внезапного расширения (сужения).

$$\xi_{вн.р} = \xi_{гл} (1 + \alpha/0,01), \quad (8.196)$$

где $\xi_{гл}$ — коэффициент местного сопротивления гладкого воздуховода; α — коэффициент аэродинамического сопротивления трению, Н·с²/м⁴.

При проветривании выработки с непрерывным пылевыведением целесообразно производить очистку воздуха, повторно направляемого в забой.

С учетом сопротивления фильтра, установленного на всасе вентилятора-турбулизатора, уравнение (8.194) примет вид

$$R_1 = R_{вх} + R_{вых} + R_{\phi}, \quad (8.197)$$

где R_{ϕ} — сопротивление фильтра, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$.

Сопротивление фильтров ФВМ-1, ПФ-5 при производительности вентилятора 1,7—1,9 $\text{м}^3/\text{с}$ составляет в среднем 22 $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ [13].

Сопротивления всасывающего (R_2) и нагнетательного (R_3) воздухопроводов можно рассчитать по формулам:

$$R_2 = R_{2,тр} + R'_{вх} + R'_{вых} = 6,45 \frac{\alpha_2 L_2}{d_2^5} + \frac{2}{d_2^4} \xi_{вн.р}; \quad (8.198)$$

$$R_3 = R_{3,тр} + R'_{вх} + R'_{вых} = 6,45 \frac{\alpha_3 L_3}{d_3^5} + \frac{2}{d_3^4} \xi_{вн.р}; \quad (8.199)$$

где $R_{2,тр}$, $R'_{вх}$, $R'_{вых}$ — соответственно сопротивление трения, входа и выхода всасывающего воздухопровода, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$; $R_{3,тр}$, $R'_{вх}$, $R'_{вых}$ — то же, для нагнетательного воздухопровода; α_2 , L_2 , d_2 — соответственно коэффициент аэродинамического сопротивления трения ($\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$), длина (м) и диаметр (м) всасывающего воздухопровода; α_3 , L_3 , d_3 — тоже, для нагнетательного воздухопровода.

Для приближенной сравнительной оценки рассматриваемых способов проветривания с точки зрения энергетических затрат по уравнению (8.193) были построены графики зависимости $\bar{W}_r/\bar{W}_к$ от длины выработки L (рис. 8.15 и 8.16) и от коэффициента рециркуляции e (рис. 8.17 и 8.18) для металлического всасывающего и прорезиненного нагнетательного трубопроводов диаметром 0,5 м. При расчете R_1 , R_2 и R_3 использованы зависимости, приведенные выше. Длина нагнетательного трубопровода принята 100 м. Расходы воздуха Q и $Q_{вс}$ при проветривании выработки с периодически и непрерывными источниками выделения пыли определяли следующим образом.

При комбинированном способе проветривания расход свежего воздуха для проветривания выработок после взрыва ВВ, исходя из зависимости (8.155), определяли из выражения

$$Q_{во} = 1,3 l_{в.о} SB / \{ [0,3 (mB + 1) + k_t] t k_t \}, \quad (8.200)$$

где t — время проветривания выработки, с.

При проветривании с применением вентилятора-турбулизатора требуемый расход свежего воздуха при взрывных работах в соответствии с уравнениями (8.161) и (8.162) находим из уравнения

$$Q = \frac{l_1 SB}{t} \left[\frac{l_{в.о}/l_1 - 1}{mB + 1} + \frac{1 - e(1 - k_t)}{k_t} \right]. \quad (8.201)$$

Рис. 8.15. График зависимости W_T/W_K от длины L проветриваемой выработки при проветривании ее после взрывных работ:

1, 2, 3, 4 и 5 — соответственно для ϵ , равного 0; 0,4; 0,6; 0,6 и 0,7

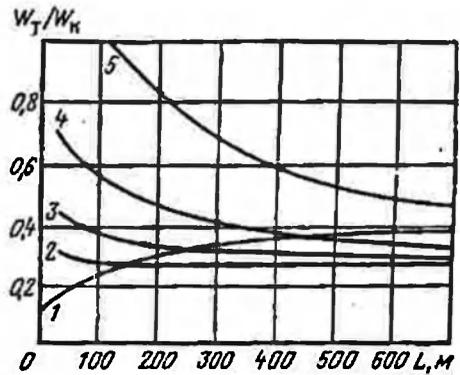


Рис. 8.16. График зависимости W_T/W_K от длины проветриваемой выработки L при непрерывном выделении пыли:

1, 2, 3, 4 и 5 — соответственно для ϵ , равного 0; 0,4; 0,6; 0,6 и 0,9

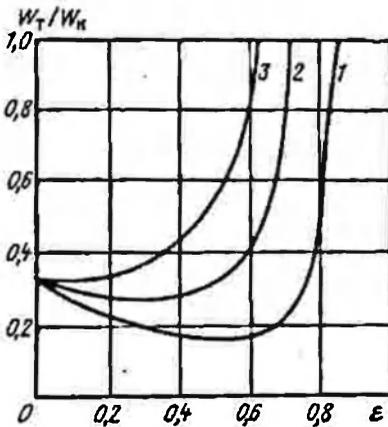
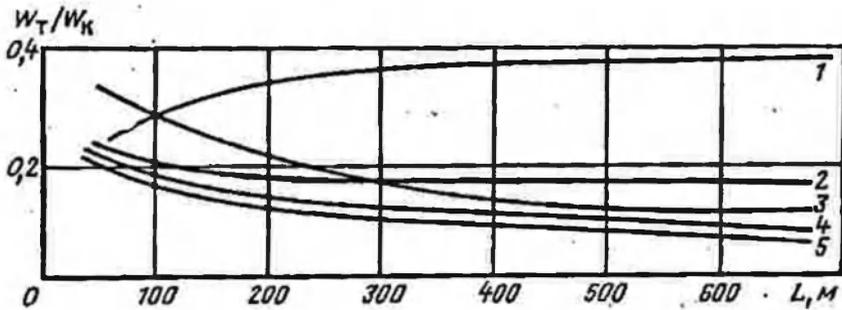


Рис. 8.17. График зависимости W_T/W_K от коэффициента рециркуляции ϵ при проветривании выработки после взрывных работ:

1, 2 и 3 — соответственно для k_1 , равного 0,3; 0,6 и 0,9

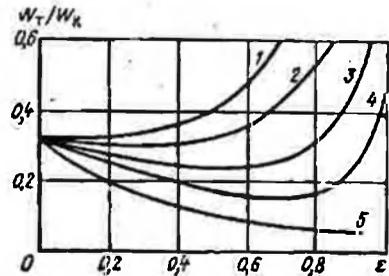


Рис. 8.18. График зависимости W_T/W_K от коэффициента рециркуляции ϵ при непрерывном выделении пыли:

1, 2, 3, 4 и 5 — соответственно для η , равной 0,3; 0,4; 0,5; 0,7 и 1,0

При непрерывных пылевыведениях расход свежего воздуха на проветривание при комбинированном способе, исходя из (7.26) и (8.190), рассчитывали по формуле

$$Q_{\text{вс}} = \frac{0,4k_f d_1^4}{\varphi_T F_0} \left[n_d - n' \pm \sqrt{(n_d - n')^2 - \frac{6,5\varphi_T F_0^2}{k_f^2 d_1^4}} \right]. \quad (8.202)$$

При проветривании с использованием вентилятора-турбулизатора с очисткой повторно используемого воздуха от пыли расход свежего воздуха при непрерывных пылевыведениях определяли по формуле

$$Q = \frac{0,5k_f (1 - \epsilon)}{\varphi' F_0} \left[n_d \pm \sqrt{n_d^2 - \frac{4F_0^2 \varphi'}{k_f^2}} \right]. \quad (8.203)$$

Степень очистки воздуха от пыли принимали равной 1.

Из графиков, представленных на рис. 8.15 и 8.16, видно, что экономичность рециркуляционного способа возрастает с увеличением длины выработки. При проветривании выработки после взрывных работ увеличение рециркуляции выше некоторого предела приводит к росту энергозатрат (см. рис. 8.17). Оптимальное значение коэффициента рециркуляции, при котором достигаются наименьшие энергетические затраты на проветривание выработки после взрывных работ, колеблется в пределах от 0,3 до 0,5. При этих значениях коэффициента рециркуляции способ проветривания с использованием вентилятора-турбулизатора требует в 2,5—4 раза меньше энергозатрат, чем комбинированный (нагнетательно-всасывающий) способ проветривания.

При проветривании выработки с непрерывным пылевыведением способ проветривания с использованием вентилятора-турбулизатора в зависимости от степени очистки воздуха от пыли в 5—10 раз экономичнее комбинированного (см. рис. 8.18).

Расчет проветривания тупиковой выработки по пылевому фактору при использовании вентилятора-турбулизатора производится в следующей последовательности.

1. Если расход свежего воздуха Q не задан, принимают наибольшее его значение, полученное при расчете по другим факторам.

2. По формуле (7.9) определяют оптимальное удаление вентилятора-турбулизатора от забоя l_1 . Если найденное значение l_1 будет меньше $10 + \sqrt{S}$, к расчету принимается $l_1 = 10 + \sqrt{S}$.

3. Задавшись диаметром выходного отверстия вентилятора-турбулизатора и степенью очистки воздуха от пыли в фильтре, по формуле (8.173) рассчитывают коэффициент φ' для наиболее интенсивного источника непрерывного пылевыведения.

4. Определяют приведенный диаметр трубопровода в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 7.2, рассчитывают комплексный параметр $al_1/d_{\text{тр}}$ и по табл. 7.1 определяют коэффициент турбулентной диффузии свободной струи, создаваемой вентилятором-турбулизатором.

5. По уравнению (8.180) находят запыленность в выработке при прямом проветривании выработки.

6. Если $n_n > n_d$, определяют оптимальное значение коэффициента $\epsilon_{\text{опт}}$, обеспечивающего минимальную запыленность в выработке при рециркуляционном проветривании. Расчет производят по формуле (8.185).

7. По уравнению (8.186) рассчитывают минимальную запыленность, которая может быть достигнута при рециркуляционном проветривании.

8. Если $n_{\text{min}} > n_d$, выбирают больший диаметр выходного отверстия вентилятора-турбулизатора и расчет повторяют.

9. Если $n_{\text{min}} \leq n_d$, определяют область значений коэффициента рециркуляции, при которых запыленность в выработке не будет превышать ПДК. Расчет ведут по формуле

$$\epsilon_{1,2} = 1 - \frac{0,5Qk_t}{F_0} \left[n_d \pm \sqrt{n_d^2 - \frac{4\varphi'F_0^2}{k_t^2}} \right] \quad (8.204)$$

10. Из выражения (1.1) рассчитывают количество пыли, образующейся при взрыве ВВ.

11. По формулам (1.2) и (4.8) определяют длину зоны отброса газов и пыли при взрыве ВВ и начальную запыленность в проветриваемом объеме.

12. Из выражения (8.150) рассчитывают величину B .

12. Находят минимальное значение коэффициента рециркуляции, обеспечивающего проветривание выработки после взрыва ВВ за заданное время, по формуле

$$\epsilon_{\text{min}} = \frac{1}{1 - k_t} \left[1 - k_t \left(\frac{Qt}{l_{1SB}} - \frac{l_{a.o}/l_1 - 1}{mB + 1} \right) \right] \quad (8.205)$$

14. Выбирают значение коэффициента рециркуляции, отвечающее условиям:

$$\epsilon_1 \leq \epsilon \leq \epsilon_2 \quad \text{и} \quad \epsilon_{\text{min}} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\text{опт}} \quad (8.206)$$

15. Определяют требуемую производительность вентилятора по формуле (8.189).

Если производительность вентилятора-турбулизатора Q_T известна, расчет рециркуляционного проветривания сводится к определению минимального расхода свежего воздуха, достаточного для снижения запыленности в проветриваемой выработке до ПДК. В этом случае расчет производят в следующей последовательности.

1. Из выражения (8.173) находят значение φ' . По формулам (8.177) и (8.176) определяют минимальную запыленность n_{min} , которая может быть при данном диаметре выходного отверстия вентилятора-турбулизатора, и производительность вентилятора-турбулизатора Q_T , при которой она достигается.

2. Если $n_{\text{min}} > n_d$, к вентилятору-турбулизатору предусматривают расширяющуюся насадку большего диаметра и расчет повторяют.

3. Если $n_{\min} = n_d$, а $Q_T > 1/\sqrt{\varphi'}$, предусматривают прямоочное проветривание без очистки воздуха. Производительность вентилятора при этом должна быть снижена до $1/\sqrt{\varphi'}$, расход свежего воздуха Q принимают не менее производительности вентилятора-турбулизатора.

4. Если $n_{\min} < n_d$, или $Q_T < 1/\sqrt{\varphi'}$, $n_{\min} = n_d$, предусматривают рециркуляционную схему с очисткой повторно используемого воздуха от пыли и определяют минимальное значение ϵ , при котором запыленность в выработке не будет превышать допустимую. Расчет ведут по формуле

$$\epsilon_{\min} = 1 - F_0 (1 + \varphi' Q_T) / (Q_T k_T n_d). \quad (8.207)$$

5. По формулам (1.1), (1.2), (4.8) и (8.150) рассчитывают количество пыли, образующейся при взрыве ВВ, длину зоны отброса газов и пыли, начальную запыленность в выработке после взрыва ВВ и значение параметра B .

6. Определяют область значений коэффициента рециркуляции, обеспечивающих проветривание выработки за заданное время t ,

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\frac{k_t (l_{a.o}/l_1 - 1)}{mB + 1} + 2 - k_t \pm \sqrt{\left[\frac{k_t (l_{a.o}/l_1 - 1)}{mB + 1} + 2 - k_t \right]^2 - 4(1 - k_t) \left[\frac{k_t (l_{a.o}/l_1 - 1)}{mB + 1} - \frac{k_t Q_T t}{l_1 S B} \right]}{2(1 - k_t)} \quad (8.208)$$

7. Выбирают величину коэффициента рециркуляции ϵ , отвечающую условиям (8.206), и находят требуемый расход свежего воздуха по формуле

$$Q = Q_T (1 - \epsilon). \quad (8.209)$$

8.5 Способ проветривания, исключаящий опасное загрязнение исходящей струи

Проветривание тупиковых горных выработок после взрывных работ сопровождается загрязнением продуктами взрыва следующих по ходу вентиляционной струи выработок. Продолжительность и степень их загрязнения зависят от условий взрывания и проветривания. Наблюдения за содержанием вредных примесей в исходящей струе при нагнетательном, всасывающем и всасывающем в комбинации с нагнетательным трубопроводом способа проветривания тупиковых выработок, проведенные на предприятиях СУБРа и п. о. «Уралзолото», показали, что загрязненный воздух с содержанием вредных примесей, превышающим предельно допустимые концентрации, поступает в исходящую струю в течение 10—20 мин. Опасное загрязнение исходящей струи имеет место при всех способах проветривания.

Загрязнение следующих по ходу вентиляционной струи выработок отрицательно сказывается на ведении горных работ: повышается их опасность, ухудшаются санитарно-гигиенические условия труда. Рабочих выводят из выработок, прекращают работы или взрывание и проветривание производят в междусменные перерывы.

На 75 % обследованных горнорудных предприятиях Урала постоянно имеют место случаи загазирования горных работ при проветривании соседней выработки. На большинстве предприятий взрывные работы приурочивают к междусменным перерывам, что отрицательно сказывается на производительности труда и скорости проведения выработок. Безопасное содержание вредных примесей в исходящей из тупиковой выработки воздушной струе достигается за счет разбавления их до ПДК дополнительным количеством чистого воздуха и временным аккумулярованием вредных примесей с последующим регулируемым их выпуском.

В первом случае содержание вредных примесей в газовом облаке неравномерно, максимальные концентрации во много раз превышают ПДК. При аккумуляровании вредных примесей обеспечивается безопасное их содержание в исходящей струе при любых расходах воздуха. Для этого используют либо выработку, в которой ведут взрывные работы, либо соседние нерабочие выработки. Большой опыт по обеспечению безопасного содержания вредных примесей в исходящей струе с их аккумулярованием в самой выработке накоплен при разгазировании тупиковых выработок в угольных шахтах. Вредные примеси в исходящей струе разбавляются до безопасных концентраций путем выпуска части воздуха из нагнетательного трубопровода через клапан, расположенный вблизи устья выработки [21, 22]. Однако этому способу присущи следующие недостатки нагнетательного проветривания:

с увеличением длины выработки увеличивается расход воздуха;

в процессе проветривания выработки после взрыва ВВ в забое происходит загазирование всего ее объема.

В Свердловском горном институте разработан способ проветривания, исключаящий опасное загрязнение исходящей струи после взрывных работ, с аккумулярованием вредных примесей во всасывающем трубопроводе (рис. 8.19). В тупиковой выработке устанавливается трубопровод 1 с отверстием 2 и вентилятором, расположенным в сквозной выработке 3. Загрязненный воздух, поступающий в трубопровод, через регулятор смешивается с чистым. Количество загрязненного и чистого воздуха регулируют во времени таким образом, чтобы содержание вредных примесей в основной выработке не превышало ПДК.

С целью повышения эффективности проветривания призабойной части выработки в ней устанавливается вентилятор-турбулизатор 4 или нагнетательный вентилятор с коротким трубопроводом.

Загрязненный при взрыве заряда ВВ объем тупиковой выработки может проветриваться различными способами, но удаление

вредных примесей из него происходит через всасывающий трубопровод. По условиям проветривания интенсивность выделения вредных примесей в основную выработку не должна превышать некоторой величины. Это условие можно выразить уравнением вида

$$n_{исх} Q \leq n'_d Q_B \quad (8.210)$$

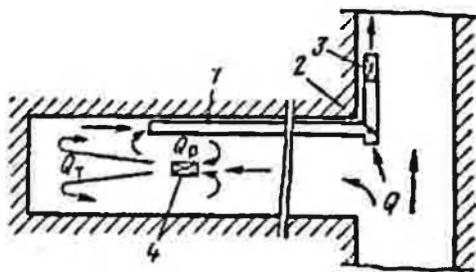


Рис. 8.19. Комбинированный способ проветривания тупиковой выработки, исключающий опасное загрязнение исходящей струи

где $n_{исх}$ — концентрация вредных примесей у отверстия 2 (см. рис. 8.19); n'_d — допустимая концентрация вредных примесей в воздухе, выбрасываемом в основную выработку; Q — количество воздуха, проходящего по всасывающему трубопроводу, м³/с; Q_B — производительность всасывающего вентилятора, м³/с.

$$n'_d = Q_0 n_d / Q_B \quad (8.211)$$

где n_d — предельно допустимая концентрация вредных примесей, при которой разрешается допускать рабочих в забой после взрыва ВВ; Q_0 — количество воздуха, проходящего по основной выработке, м³/с.

Тупиковая выработка проветривается с наибольшей эффективностью при удалении вредных примесей из нее с максимальной интенсивностью. Поэтому условие (8.210) можно ограничить равенством

$$n_{исх} Q = n'_d Q_B \quad (8.212)$$

Если для проветривания поступает воздух, не содержащий вредных примесей, то общее количество их, выделившихся в атмосферу выработки после взрыва ВВ,

$$q_{об} = V_{зо} n_0$$

где $V_{зо}$ — объем зоны отброса газов или пыли, м³; n_0 — начальная концентрация вредных примесей в зоне отброса.

Баланс вредных примесей в момент окончания проветривания, когда содержание их в призабойной части выработки снизится до ПДК, следующий:

количество вредных примесей, удаленных из выработки,

$$q_1 = Q_B n'_d t$$

где t — продолжительность выброса вредных примесей из трубопровода, с;

количество вредных примесей, находящихся в трубопроводе, q_2 .

количество вредных примесей в призабойной части выработки

$$q_3 = n_d V_{в.о},$$

$$q_{об} = q_1 + q_2 + q_3. \quad (8.213)$$

Подставив в выражение (8.213) значения $q_{об}$, q_1 и q_3 , найдем продолжительность регулируемого выпуска вредных примесей

$$t = \frac{n_0 V_{в.о}}{n'_d Q_{в.о}} \left(1 - \frac{q_2 + n_d V_{в.о}}{n_0 V_{в.о}} \right).$$

Выражение $(q_2 + n_d V_{в.о}) / (n_0 V_{в.о})$ представляет собой коэффициент аккумуляирования вредных примесей, показывающий какая их часть по окончании проветривания остается в трубопроводе и призабойной части выработки. Обозначим его через K_a , тогда

$$t = n_0 V_{в.о} (1 - K_a) / (n'_d Q_{в.о}). \quad (8.214)$$

Общая продолжительность проветривания с учетом времени, затрачиваемого на заполнение трубопровода вредными примесями,

$$t_{об} = n_0 V_{в.о} (1 - K_a) / (n'_d Q_{в.о}) + V_T / Q_{в.о}, \quad (8.215)$$

где V_T — объем всасывающего трубопровода, м³.

Чем больше значение K_a , тем быстрее проветривается выработка. Величина K_a зависит от объема аккумуляирования, производительности вентиляторов, расположения вентиляционного оборудования в выработке и способа проветривания призабойной зоны.

Изменение количества вредных примесей в проветриваемом объеме за бесконечно малое время dt

$$dq = n_v Q_{в.о} dt. \quad (8.216)$$

где n_v — концентрация вредных примесей у начала всасывающего трубопровода.

Процесс изменения средней концентрации вредных примесей в проветриваемом объеме

$$dq = -V dn$$

или с учетом (8.216)

$$n_v Q_{в.о} = -V \frac{dn}{dt}. \quad (8.217)$$

Концентрация вредных примесей у начала всасывающего трубопровода n_v и его производительность изменяются во времени. Определим зависимость $Q = f(t)$.

Количество вредных примесей, прошедшее к моменту времени t после начала проветривания через устье всасывающего трубопровода, можно определить по уравнению

$$q = V (n_0 - n), \quad (8.218)$$

где n — средняя концентрация вредных примесей в проветриваемом объеме в момент времени t . Объем воздуха, находящийся в

начале выброса вредных примесей в основную выработку у устья всасывающего трубопровода, окажется у отверстия 2 к тому времени, когда вредные примеси в количестве q будут выброшены в основную выработку.

С учетом (8.212) время, через которое этот объем воздуха окажется у отверстия 2,

$$t = q / (n_2 Q_2) \quad (8.219)$$

или с учетом уравнения (8.218)

$$t = V(n_0 - n) / (n_2 Q_2). \quad (8.220)$$

Концентрация вредных примесей в воздухе у начала трубопровода n_2 зависит от их средней концентрации в проветриваемом объеме

$$n_2 = \varphi(n).$$

Это выражение можно представить в виде

$$n = f(n_2). \quad (8.221)$$

С учетом (8.212) и (8.221) уравнение (8.220) можно привести к виду

$$t = V[n_0 - f(n_2 Q_2 / Q)] / (n_2 Q_2). \quad (8.222)$$

Для того, чтобы решить основное уравнение проветривания (8.217), нужно найти зависимость $n_2 = f(n)$. Если граница загрязненной продуктами взрыва зоны проходит через вентилятор-турбулизатор, то часть воздуха при выходе из призабойной зоны вторично попадает в его всас. Тогда концентрация вредных примесей в воздухе, исходящем из проветриваемой зоны,

$$n_{всх} = nk_t + (1 - k_t) n_T, \quad (8.223)$$

где n_T — концентрация вредных примесей в воздухе, выходящем из вентилятора-турбулизатора; k_t — коэффициент турбулентной диффузии свободной струи.

Концентрация вредных примесей у всаса вентилятора-турбулизатора

$$n_T = \frac{n_{всх} Q_p}{Q_T} = \varepsilon n_{всх}, \quad (8.224)$$

где Q_p — количество воздуха, рециркулирующее через вентилятор-турбулизатор, м³/с; Q_T — производительность вентилятора-турбулизатора, м³/с; ε — коэффициент рециркуляции.

При решении уравнений (8.223) и (8.224) получим

$$n_{всх} = nk_t / [1 - (1 - k_t) \varepsilon]. \quad (8.225)$$

Концентрация вредных примесей в воздухе у всаса трубопровода

$$n_2 = n_{всх} Q_T (1 - \varepsilon) / Q. \quad (8.226)$$

С учетом (8.225) выражение (8.226) примет вид

$$n_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{т}}}{Q} \frac{nk_{\text{т}}(1-\varepsilon)}{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon} \quad (8.227)$$

При $V=V_{\text{в.о}}$ уравнение (8.222) с учетом (8.227) примет вид

$$t = \frac{V_{\text{в.о}}}{n_{\text{д}}' Q_{\text{в}}} \left[n_{\text{н}} - \frac{n_{\text{д}}' Q_{\text{в}}}{Q_{\text{т}}} \frac{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon}{k_{\text{т}}(1-\varepsilon)} \right] \quad (8.228)$$

Для вывода уравнения, описывающего процесс проветривания, подставим в выражение (8.217) вместо $n_{\text{в}}$ его значение из (8.227)

$$-\frac{Q_{\text{т}}}{V_{\text{в.о}}} \frac{k_{\text{т}}(1-\varepsilon)}{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon} dt = \frac{dn}{n} \quad (8.229)$$

Из уравнения (8.228) следует

$$\frac{k_{\text{т}}(1-\varepsilon)}{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{т}}} \frac{n_{\text{д}}' V_{\text{в.о}}}{n_0 V_{\text{в.о}} - n_{\text{д}}' Q_{\text{в}} t} \quad (8.230)$$

Подставив выражение (8.230) в уравнение (8.229), получим

$$-\frac{n_{\text{д}}' Q_{\text{в}} dt}{n_0 V_{\text{в.о}} - n_{\text{д}}' Q_{\text{в}} t} = \frac{dn}{n} \quad (8.231)$$

Проинтегрировав уравнение (8.231), получим

$$\frac{n_0 V_{\text{в.о}} - n_{\text{д}}' Q_{\text{в}} t}{n V_{\text{в.о}}} = C \quad (8.232)$$

Для отыскания постоянной интегрирования C найдем начальные условия.

Изменение средней концентрации вредных примесей в проветриваемом объеме в период заполнения трубопровода описывается уравнением (8.217). С учетом того, что в этот период всасывающий трубопровод работает с максимальной производительностью $Q_{\text{в}}$, а концентрация вредных у его всаса определяется по уравнению (8.227), выражение (8.217) можно записать в следующем виде:

$$n Q_{\text{т}} \frac{k_{\text{т}}(1-\varepsilon_{\text{н}})}{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon_{\text{н}}} = -V_{\text{в.о}} \frac{dn}{dt} \quad (8.233)$$

где $\varepsilon_{\text{н}}$ — коэффициент рециркуляции в период заполнения вредными примесями всасывающего трубопровода.

Проинтегрировав уравнение (8.233), получим

$$-\frac{Q_{\text{т}} t}{V_{\text{в.о}}} \frac{k_{\text{т}}(1-\varepsilon_{\text{н}})}{1-(1-k_{\text{т}})\varepsilon_{\text{н}}} = \ln n + C' \quad (8.234)$$

Для отыскания постоянной интегрирования C' подставим в полученное уравнение начальные условия (при $t=0$, $n=n_0$).

$$C' = -\ln n_0 \quad (8.235)$$

Подставив значение C' в уравнение (8.234), получим

$$n = n_0 \exp \left[- \frac{Q_T t}{V_{з.о}} \frac{k_t (1 - \varepsilon_H)}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right]. \quad (8.236)$$

В момент времени $t = \bar{V}_T / \bar{Q}_B$ концентрация вредных примесей в проветриваемом объеме будет

$$n = n_0 \exp \left[- \frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right].$$

Запишем начальные условия для решения уравнения (8.232):

$$\text{при } t = 0 \quad n = n_0 \exp \left[- \frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right].$$

При этих условиях постоянная интегрирования

$$C = \exp \left[\frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right]. \quad (8.237)$$

Подставив значение C в уравнение (8.232), получим

$$n = \left(n_0 - \frac{Q_B n_d t}{V_{з.о}} \right) \exp \left[- \frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right]. \quad (8.238)$$

При $n = n_d$ определим из уравнения (8.238) время регулируемого выпуска вредных примесей в основную выработку

$$t = \frac{n_0 V_{з.о}}{n_d Q_B} \left\{ 1 - \frac{n_d}{n_0} \exp \left[\frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right] \right\}. \quad (8.239)$$

С учетом времени, затраченного на заполнение трубопровода, общая продолжительность проветривания

$$t_{об} = \frac{n_0 V_{з.о}}{n_d Q_B} \left\{ 1 - \frac{n_d}{n_0} \exp \left[\frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right] \right\} + \frac{V_T}{Q_B}. \quad (8.240)$$

Из уравнений (8.214) и (8.239) следует, что величина коэффициента аккумулярования

$$K_a = \frac{n_d}{n_0} \exp \left[\frac{V_T}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right].$$

Из уравнения (8.240) видно, что с увеличением проветриваемого объема и начальной концентрации вредных примесей продолжительность проветривания возрастает, а с увеличением производительности вентиляторов и коэффициента k_t — уменьшается.

Для определения влияния объема всасывающего трубопровода на время проветривания обозначим:

$$\frac{V_{з.о} n_d}{n_0} = B; \quad \frac{1}{V_{з.о}} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} = D$$

и, приравняв производную

$$t'_{об} = - \frac{BD}{Q_B} e^{V_T D} + \frac{1}{Q_B}$$

пулю, найдем критическое значение аргумента V_T :

$$V_T = -\frac{1}{D} \ln |BD|,$$

или

$$V_T = -V_{a.o} \frac{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H}{k_t} \ln \left| \frac{n_d}{n'_d} \frac{k_t}{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H} \right|. \quad (8.241)$$

Из (8.214) следует, что критическое значение аргумента, соответствующее максимуму функции, всегда находится в области отрицательных значений.

При положительных значениях величины V_T функция (8.240) убывающая. С увеличением объема трубопровода снижается продолжительность проветривания.

Минимальное время проветривания будет при объеме трубопровода, позволяющем проветрить выработку в период заполнения его вредными примесями

$$V_T \geq V_{a.o} \frac{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H}{k_t} \ln \frac{n_0}{n_d}.$$

При данном объеме трубопровода общее время проветривания

$$t_{об} = \frac{V_{a.o}}{Q_B} \frac{1 - (1 - k_t) \varepsilon_H}{k_t} \ln \frac{n_0}{n_d}.$$

При дальнейшем увеличении объема всасывающего трубопровода время проветривания не изменяется.

В практике объем трубопровода обычно недостаточен для полного аккумулярования вредных примесей, поэтому значения коэффициента K_a меньше единицы.

При использовании для интенсификации воздухообмена в призабойной зоне нагнетательного вентилятора с коротким трубопроводом коэффициент аккумулярования рассчитывают по формуле

$$K_a = \frac{n_d}{n_0} \exp \left[\frac{V_T}{V_{a.o}} \frac{1,3k_t}{0,3k_t + 1} \right].$$

Регулирование поступления чистого и загрязненного воздуха в трубопровод может осуществляться как в автоматическом режиме, так и по заранее составленной программе.

В первом случае в исходящей струе устанавливается датчик, регистрирующий содержание вредных примесей. При появлении вредных примесей в исходящей струе в опасных концентрациях датчик передает сигнал на регулирующий орган, который уменьшает количество воздуха, отсасываемого из проветриваемого объема и увеличивает поступление чистого воздуха в трубопровод.

При отсутствии датчиков для непрерывного контроля концентрации ядовитых газов, образующихся при взрывных работах, регулирование поступления чистого и загрязненного воздуха в трубопровод производят по заранее рассчитанной программе.

Программа регулирования рассчитывается с учетом условий проветривания, параметров взрывных работ, размеров выработки и других факторов.

Количество загрязненного Q и количество чистого воздуха Q' , поступающего в трубопровод, связаны следующей зависимостью:

$$Q' = Q_{\text{в}} - Q.$$

Для обеспечения безопасного содержания вредных примесей в исходящей струе поступление загрязненного воздуха во всасывающей трубопровод во времени регулируют по выражению

$$Q = \frac{Q_0}{n_0/n_{\text{Д}} - Q_{\text{в}}t/V_{\text{в.о}} - Q_{\text{в}}(1 - k_f)/(Q_{\text{Т}}k_f)}.$$

На рис. 8.20 представлены результаты производственных испытаний способа проветривания, исключающего опасное загрязне-

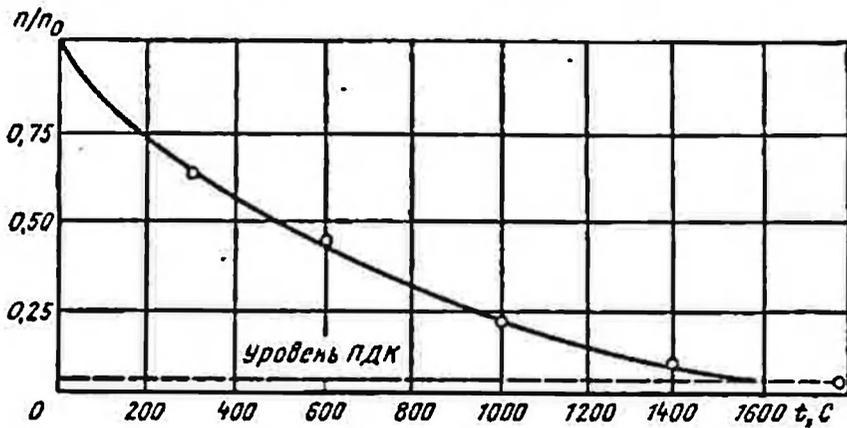


Рис. 8.20. График зависимости относительной концентрации пыли n/n_0 от времени проветривания t при комбинированном способе проветривания, исключающем опасное загрязнение исходящей струи

ние исходящей струи, с аккумулярованием вредных примесей во всасывающем трубопроводе. Из рисунка видно, что проветривание тупиковой выработки осуществляется за время, предусмотренное ПБ.

Основной недостаток способа проветривания с аккумулярованием вредных примесей в трубопроводе — малый объем аккумулярования. Это вызывает необходимость регулирования поступления в трубопровод загрязненного и чистого воздуха и увеличивает время проветривания выработки.

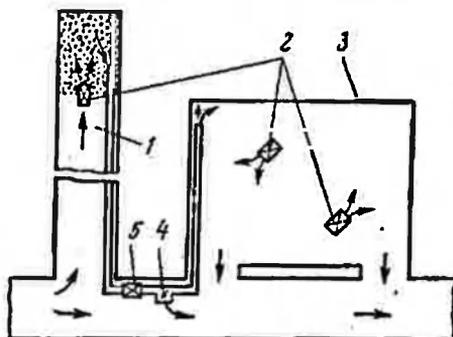
На рис. 8.21 показана схема проветривания проходческого забоя с временным аккумулярованием вредных примесей в соседней нерабочей выработке.

После взрыва в забое заряда ВВ, загрязненный воздух с помощью вентилятора 5 удаляется из проветриваемой выработки 1 и заполняет соседнюю нерабочую выработку 3. После снижения концентрации вредных примесей в забое до ПДК регулятором 4

производится перераспределение воздуха, идущего по трубопроводу. Одна часть его по трубопроводу направляется в аккумулирующую выработку, другая — через окно регулятора выбрасывается в основную выработку. В аккумулирующую выработку направляют такое количество воздуха, чтобы концентрация вредных примесей в исходящей из нее воздушной струе разбавлялась до ПДК свежим воздухом, проходящим по основной выработке.

Рис. 8.21. Схема проветривания, исключающая опасное загрязнение исходящей струи, с аккумулярованием вредных примесей в соседней выработке:

1 — проветриваемая выработка; 2 — вентиляторы-турбулизаторы; 3 — аккумулирующая выработка; 4 — устройство для регулирования расхода воздуха; 5 — основной вентилятор



Количество свежего воздуха Q , необходимого для проветривания, если оно не задано, принимают по минимально допустимой скорости вентиляционной струи. При известной производительности вентилятора-турбулизатора расход свежего воздуха на проветривание определяют из уравнения (8.162) с учетом (8.159).

Минимальный объем выработки, необходимый для аккумулярования вредных примесей, рассчитывают по формуле

$$V_a = Qt,$$

где t — время проветривания забоя, с.

Средняя концентрация вредных примесей в объеме аккумулярования в момент окончания проветривания забоя

$$n = n_0 V_{в.о} / V_a.$$

Для того чтобы содержание вредных примесей в основной выработке не превышало ПДК, расход воздуха для проветривания аккумулирующей выработки не должен превышать величины, определяемой из выражения

$$Q_a = Q_0 n_d V_a / (n_0 V_{в.о}),$$

где Q_0 — количество воздуха, проходящего по основной выработке, м³/с.

Продолжительность проветривания аккумулирующей выработки

$$t_a = \frac{V_{в.о}}{Q_0} \frac{n_0}{n_d} \ln \left| \frac{V_{в.о}}{V_a} \frac{n_0}{n_d} \right|.$$

С целью повышения эффективности проветривания в аккумулирующей выработке целесообразно устанавливать вентиляторы-турбулизаторы. Достоинством данного способа являются его простота и надежность.

9. ПЫЛЕВОЙ КОНТРОЛЬ

9.1. Методы пылевого контроля

При измерениях концентрации рудничной пыли определяют ее соответствие установленным нормам, исследуют эффективность способов и средств профилактики профессиональных заболеваний.

В настоящее время при изучении рудничной пыли применяют следующие методы:

1. *Весовой* — определение содержания пыли в воздухе в весовых единицах. Этот метод основан или на извлечении пыли из воздуха определенного объема фильтрацией, электропрещипитацией и другими физическими способами с последующим взвешиванием навески пыли или на непосредственном определении косвенными методами количества взвешенных в воздухе частиц по массе без их осаждения. Первое направление имеет широкое распространение. Основные его преимущества заключаются в возможности получения представительной пробы в процессе длительного отбора сравнительно больших количеств воздуха и направления осажденной пыли на последующий анализ вещественного и дисперсного состава другими методами, в простоте устройств для отбора проб.

2. *Счетный* — определение содержания числа частиц пыли в единице объема. Этот метод, от которого отказались при нормировании запыленности вследствие его гигиенической необоснованности, в процессах исследования аэрозолей имеет ряд достоинств: простота аппаратуры, возможность отбора проб в небольшие промежутки времени с последующим анализом микроскопией, отсутствие пневматического или электрического привода для аспирации исследуемого воздуха, что имеет существенное значение при исследованиях на рудниках.

3. *Методы микроскопии* применяются для изучения дисперсного и вещественного состава пылей, исследования размеров, формы: состава не только относительно крупных частиц (оптическая микроскопия с автоматическими счетчиками-анализаторами), но и мельчайших частиц и их агрегатов (растровая, электронная микроскопия).

Методы микроскопии применяются также для определения удельной поверхности частиц, приходящейся на единицу массы пыли. Однако, при изучении шахтных аэрозолей это практикуется редко. Между тем, дальнейшее применение методов микроскопии для определения в одной пробе отдельно удельной поверхности фракций от 0 до 5 мкм позволит проводить более точные исследования в области инженерно-медицинской профилактики пневмоконнозов.

4. *Химические, петрографические, спектроскопические и рентгенографические методы* используются при изучении вещественного состава пылей.

Проведенными исследованиями в нашей стране был обоснован весовой метод пылевого контроля.

В настоящее время в странах — членах СЭВ и других странах ориентируются преимущественно либо на двухступенчатый контроль и двухступенчатое нормирование промышленных пылей с выделением респираторной тонкодисперсной фракции (по массе), либо принимают в расчет эту фракцию, пренебрегая всей массой пыли, как менее опасной по пневмокониозу.

Учитывая, что вся вдыхаемая пыль воздействует на организм человека, на симпозиуме специалистов стран — членов СЭВ, работающих по комплексной проблеме «Гигиена труда и профессиональные заболевания», было отмечено, что неизбежность осложнения пылевого контроля и некоторые экономические вопросы в масштабах государств не позволяют считать в настоящее время целесообразным повсеместный переход на двухступенчатый контроль и тем более на двухступенчатое нормирование промышленных пылей. Деление пыли на две фракции необходимо при инженерно-технических решениях, связанных с применением пылеподавляющих устройств или проведением организационных мероприятий.

Рекомендовано продолжать на предприятиях осуществление массового пылевого контроля по простому и экономичному методу определения весовой концентрации суммы всех фракций пыли в сопоставлении с ПДК, но при исследованиях применять метод двухступенчатого контроля, который позволяет характеризовать изменения в содержании респираторной фракции, и, если они незначительны при существенном снижении общей запыленности за счет крупных фракций, отдавать предпочтение более эффективному по обоим показателям комплексу, способу, средству обеспыливания, пылемеру, датчику запыленности и т. п.

9.2. Приборы для измерения запыленности воздуха

Массовый пылевой контроль осуществляется прямым весовым методом определения концентрации всей витающей в воздухе пыли путем отбора проб на аналитические аэрозольные фильтры АФА-ВП с помощью аспиратора ППО-1. Производительность аспиратора 20 л/мин, его питание осуществляется от двух аккумуляторных батарей, габариты 340×140×190 мм, масса 5,5 кг. Отобранные пылевые пробы с навеской 1—2 мг взвешиваются на аналитических весах АДВ-200, имеющих цену деления 0,1 мг. Достоинством этой аппаратуры являются простота в эксплуатации, надежность в работе; недостатком — значительная длительность отбора проб, получение результата по всей массе пыли только на следующий день, двухступенчатый контроль не предусмотрен (он может быть проведен микроскопией с дополнительной затратой времени и средств).

Переносный радиоизотопный измеритель запыленности воздуха «ПРИЗ-1» позволяет измерять концентрацию всей пыли непосредственно на месте работ в течение 5—25 мин (в зависимости от уровня запыленности). Пределы его измерения от 1 до 500 мг/м³,

время непрерывной работы без подзарядки аккумуляторов — 8 ч, условия эксплуатации: температура окружающей среды от —10 до +40 °С и относительная ее влажность до 98 %. габариты измерительного блока 304×164×180 мм и блока питания 160×170×140 мм, масса соответственно 5,5 и 4,5 кг. Достоинством прибора является оперативный пылевой контроль на месте замера, недостатком — возможность измерения только всей массы пыли, значительная масса всего комплекта, рассчитанного практически на двух человек. Кроме того, опыт применения прибора в обводненных выработках показал, что прибор недостаточно хорошо защищен от загрязнений и капежа и может быть использован в сухих выработках.

Для оценки использования пылемеров на подземных горных работах были произведены испытания приборов в производственных условиях*.

Испытания проводили в тупиковой горизонтальной выработке при бурении шпуров без промывки перфоратором ПР-30 к в гранитах с содержанием свободной двуокиси кремния 25—30 %. Необходимую концентрацию пыли в воздухе создавали различной интенсивностью бурения. Испытывали как отечественные, так и зарубежные образцы пылемеров и пылеотборников.

Принцип действия измерителя концентрации пыли ИКП-3Д заключается в измерении величины зарядов, переносимых движущимся аэрозолем на коллектор обтекаемой формы. Зарядка аэрозоля осуществляется в поле униполярного отрицательного коронного заряда.

Техническая характеристика ИКП-3Д

Пределы измерений, мг/м ³	0,1—1000
Время одного измерения, мин	0,2—2
Масса, кг	7
Питание — от сети переменного тока или блока малогабаритных аккумуляторов НКГ-1,5	

Прибор может работать с самописцем.

Работа радиоизотопного измерителя концентрации пыли РИП-5 основана на измерении величины поглощения β-излучения осадком пыли на фильтрах АФА-ДП-3.

Прибор обеспечивает стабильный расход исследуемого воздуха и автоматическое отключение после прокачивания заданного объема.

Техническая характеристика РИП-5

Пределы измерений, мг/м ³ :	
при отборе 200 л	До 5
при отборе 20 л	До 50
Время одного измерения, мин	1,5—17
Скорость всасывания воздуха, м/с	Не более 1,6
Масса прибора, кг	3,7

* В организации проведения испытаний принимали участие В. В. Ткачев (ИГТ и ПЗ АМН СССР), П. А. Коссов и Б. А. Калеганов (ЦНИИПП).

Принцип действия радиоизотопного измерителя концентрации аэрозоля ИКАР основан на измерении величины поглощения мягкого β -излучения слоем пыли, осажденной из воздуха на фильтровальную ленту НЭЛ-3

Техническая характеристика ИКАР

Пределы измерений, мг/м ³ :	
для рудных шахт	От 1 до 1000
для угольных шахт	От 5 до 5000
Время измерения, мин:	
для рудных шахт	От 1,5 до 13
для угольных шахт	1
Масса блока с автономным блоком питания, кг	2,5

Пылемер позволяет измерять концентрацию всей витающей пыли и ее тонкой фракции, обеспечивает цифровую индикацию результатов измерения.

Двухступенчатый пылеотборник СПГ-10 изготовлен в ГДР и предназначен для отбора проб всей витающей в воздухе пыли с разделением на грубую и мелкую фракции в соответствии с требованиями унифицированной методики. После окончания отбора пробы прибор разбирается.

Техническая характеристика СПГ-10

Интервал температуры работы прибора, °С	От -10 до +50
Питание прибора от электросети, В	220±22
Масса, кг	7,7

Гравиметрический пылеотборник 113 А (фирма «Каселла», Великобритания) предназначен для отбора только вдыхаемой респираторной пыли в течение смены. Насос диафрагменного типа обеспечивает просасывание через прибор 2,4—2,6 л/мин воздуха, объем которого регистрируется на счетчике. Общая масса прибора составляет 3,6 кг, питание осуществляется от батарей, фильтры диаметром 55 мм из стекловолокна.

Персональный двухступенчатый пылеотборник «Симпедс 70 МК 2» (фирма «Каселла», Великобритания) служит для отбора проб витающей пыли в течение смены с разделением частиц на грубую и тонкую фракции. Просасывание 1,9 л/мин воздуха осуществляется диафрагменным насосом. Количество воздуха регистрируется счетчиком. Насос и другие части аспиратора размещены на батарее шахтного индивидуального светильника, циклон и фильтр — на каске горнорабочего.

В двухступенчатом массометре М-101 (выпускается в ФРГ и США) использован принцип поглощения β -излучения слоем пыли, осевшей на тонкой пленке. Двухступенчатое измерение осуществляется последовательно путем установки циклона. Прибор переносный с автономным питанием и цифровой индикацией величины измеренной запыленности.

Техническая характеристика М-101

Пределы измерения тонкой фракции, мг/м ³	0,1—1,5
Время одного измерения, мин	0,2—8

Количество измерений с одной заряженной батареей, шт. - 200
 Расход воздуха, л/мин 2
 Масса, кг До 3

Измерения производили одновременно всеми приборами, установленными на площадке в поперечном сечении выработки, скорость воздушной струи в которой была 0,06 м/с, влажность воздуха — 99,8—100 %. Концентрации пыли задавались от 0,7 до 340 мг/м³, в том числе по тонкой фракции от 0,7 до 44 мг/м³. Результаты измерений концентрации всей витающей пыли приведены в табл. 9.1, а тонкой фракции пыли — в табл. 9.2.

Испытания показали, что пылемеры ИКП-ЗД, РИП-5, ИКАР, а также зарубежные пылеотборники СПГ-10, «Симпедс 70 МК-2» и пылсмермассометр М-101 пригодны для пылевого контроля на рудниках, при этом максимальная разница величин концентрации всей массы пыли по отношению к фильтрам АФА-ВП составила 36 % у отечественных приборов. Однако имели место значительные расхождения в показаниях по тонкодисперсной пыли, что

Таблица 9.1

Дни испытаний	Сравниваемый интервал времени, ч	Средняя интегральная запыленность, мг/м ³						
		ИКП-ЗД	РИП-5	Фильтры АФА-ВП	ИКАР	СПГ-10	М-101	«Симпедс»
Первый	12,5—12,8	340,0	334,0	251,0	250	—	—	—
	13,3—13,6	—	—	13,2	—	—	12,7	—
	12,5—13,6	141,0	157,0	135,0	—	142,2	—	—
Второй	12,25—12,9	97,2	103,0	108,0	98	—	—	—
	12,5—13,5	20,0	17,4	18,9	—	—	—	—
	13,0—13,5	5,8	6,3	6,1	—	—	5,3	—
	12,3—13,4	44,1	43,2	45,4	—	50,0	—	38,7
Третий	11,5—12,9	3,3	4,4	3,4	3,1	3,3	3,8	4,3
Четвертый	12,4—12,5	0,5	—	0,8	0,8	0,8	1,6	—
Пятый	10,5—13,1	1,1	—	1,6	—	—	0,9	—
Четвертый и пятый	—	0,8	—	1,2	—	0,9	1,2	1,5

Таблица 9.2

Дни испытаний	Сравниваемый интервал времени, ч	Средняя интегральная запыленность, мг/м ³				
		ИКАР	СПГ-10	М-101	«Симпедс»	ИЗА
Первый	12,5—13,6	—	43,6	—	—	59,0
Второй	12,3—13,4	—	12,1	9,4	19,5	20,0
Третий	11,5—12,9	0,6	2,7	2,7	—	3,5
Четвертый и пятый	10,5—12,5 10,5—13,1	0,5	0,7	1,2	2,1	1,2

объясняется различной характеристикой устройств для разделения пыли по фракциям.

Из перечисленных приборов лишь ИКАР и М-101 отвечают в наибольшей степени предъявляемым требованиям давать оперативную информацию о степени запыленности воздуха по всей массе пыли и ее тонкодисперсной фракции непосредственно в рабочих зонах.

9.3. Методики контроля запыленности воздуха

Оценка гигиенических условий труда рабочих и определение эффективности конкретных способов и средств обеспыливания рудничной атмосферы имеют различия в методическом отношении.

Методика оценки гигиенических условий труда рабочих имеет целью установить, соответствуют ли эти условия требованиям ГОСТа и прежде всего основному требованию: запыленность атмосферы в рабочей зоне не должна превышать ПДК (в приточном воздухе — 0,3 ПДК).

Методика предусматривает следующее:

измерение запыленности воздуха на рабочем месте (в рабочей зоне), в зоне дыхания рабочего или на расстоянии не более 2 м (по направлению движения вентиляционной струи) от работающего на высоте 1,5 м от почвы выработки;

измерение пыли в приточном воздухе, поступающем в шахту, карьер или рабочую зону;

аппаратуру пылевого контроля (фильтры АФА-ВП-10 и АФА-ВП-20), пылеотборник ППО-1 с другими приборами и материалами вспомогательного назначения;

приведение условий в выработках к нормальным (температура +20 °С, атмосферное давление — 1013 гПа, относительная влажность 50 %);

планирование и организацию проведения измерений;

подготовку к определению содержания пыли в воздухе;

порядок определения запыленности на местах;

расчет содержания пыли в воздухе в лаборатории ВГСЧ;

отчетность о результатах измерений (рабочий журнал регистрации результатов измерений запыленности, извещение о результатах разовых измерений, итоговый отчет за полугодие и год о содержании пыли в воздухе на руднике с указанием числа проб, в том числе превышающих ПДК, максимальной разовой концентрации, средней запыленности по процессам и всего на подземных горных работах, в приточном воздухе, в административно-бытовом комбинате и на других рабочих местах на поверхности шахты).

Перечисленные методические требования детально разработаны в «Инструкции по контролю содержания пыли на предприятиях горнорудной и нерудной промышленности», подготовленной ЦНИИПП при участии ВНИИВТГ, ЦНИГРИ и НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР и утвержденной 13.11.79 г. Госгортехнадзором СССР.

Выполнение упомянутых методических требований даст воз-

возможность представить системно результаты оценки гигиенических условий труда по пылевому фактору, синтезировать и анализировать их на требуемом уровне.

Методики определения эффективности конкретных способов и средств обеспыливания рудничной атмосферы разрабатываются дифференцированно с учетом особенностей объекта исследования; технологии, оборудования, машин, схем вентиляции, аспирационных систем и пылеуловителей, пылесвязывающих веществ, пылесмачивающих добавок и т. п. В них в определенной степени учитываются требования, перечисленные в вышеупомянутой инструкции.

При оценке эффективности способов и средств обеспыливания следует учитывать рекомендации о делении пыли на две фракции, изложенные в материалах симпозиума специалистов стран — членов СЭВ. Методики определения эффективности способов и средств обеспыливания рудничной атмосферы, учитывающие единые для исследователей требования, позволяют повысить качество работ и сопоставимость результатов, полученных на различных рудниках в нашей стране и за рубежом.

9.4. Пылевентиляционная служба на рудниках

На всех действующих шахтах и рудниках организуется пылевентиляционная служба (ПВС), которая осуществляет контроль за проветриванием горных выработок, исправным состоянием вентиляционных устройств, работой вентиляторных установок, соблюдением вентиляционного режима, состоянием запыленности рудничной атмосферы, внедрением существующих и разработкой новых мероприятий по борьбе с пылью, соблюдением пылегазового режима, наличием, состоянием и использованием на предприятиях противопылевых средств, в том числе противопылевых респираторов.

Пылевентиляционная служба составляет планы отбора проб на запыленность, расследует причины повышения запыленности по сравнению с ПДК на рабочих местах и в приточном воздухе, оперативно доводит до сведения руководства рудника и рабочих результаты анализов запыленности. На многих рудниках ПВС регулярно проставляет на специальных стендах результаты анализа пылевых проб против фамилии бригадира с их оценкой, организует выпуск молний с описанием нарушений противопылевого режима и указанием нарушителей.

Организация технической учебы ИТР и рабочих в области осуществления борьбы с рудничной пылью и применения индивидуальных и коллективных мер защиты от вредных примесей в воздухе также входит в обязанности ПВС. Эта служба контролирует и своевременное проведение медицинского осмотра работающих в шахтах с целью установления случаев заболеваний пневмоконнозом.

Кроме того, ПВС принимает участие в разработке планов ликвидации аварий и осуществляет проверку соответствия плана фактическому состоянию горных выработок и противопожарных средств, контролирует в целом комплекс вопросов противопожарной защиты шахт и рудников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булашов М. И., Каликин И. П. Практическое руководство по фотоколориметрическим методам анализа. М., Химия, 1972.
2. Бухман Я. Э., Бакиров У. Х. Местное проветривание на металлических рудниках. М., Госгортехиздат, 1961.
3. Вентиляция шахт и карьеров/С. И. Луговский, Г. К. Дымчук, Б. Я. Дробот и др. М., Недра, 1964.
4. Воронкин В. Н., Воронкина Л. Д., Багриновский А. Д. Руководство по проектированию и практическому осуществлению противопоылевых вентиляционных режимов на рудниках. М., Госгортехиздат, 1960.
5. Воронцова Е. И., Карачаров Т. С. Вопросы гигиены труда при электросварочных работах на заводах металлоконструкций. — В кн.: Борьба с пылеобразованием на производстве. М., Медицина, 1964, с. 131—149.
6. Дядькин Ю. Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. М., Недра, 1968.
7. Ефремова Т. К., Ильина Н. П. Обеспыливающее проветривание очистных забоев угольных шахт — В кн.: Сборник работ по силикозу. Свердловск, изд. УФ АН СССР, 1961, вып. 3, с. 209—215.
8. Инструкция по комплексному обеспыливанию атмосферы подземных рудников цветной металлургии. Свердловск, изд. ЦНИИПП, 1971.
9. Коваль В. И. Обеспыливание горизонтов скреперования. — Горный журнал, 1964, № 6, с. 65—68.
10. Кочнев К. В., Дьяков В. В., Ковалев В. И. О влиянии скорости первоначальной запыленности воздушного потока на срыв пыли с поверхности шахтных выработок. — В кн.: Сборник работ по силикозу. Свердловск, изд. УФ АН СССР, 1961, вып. 3, с. 120—128.
11. Левин Л. М. Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей. М., Изд-во АН СССР, 1961.
12. Медведев И. И., Красноштейн А. Е. Борьба с пылью на калийных рудниках. М., Недра, 1977.
13. Методическое руководство по применению пылеулавливающих фильтров с использованием нетканых иглопробивных материалов М., 1974. (Цветметинформация).
14. Мустель П. И. Рудничная аэрология. М., Недра, 1970.
15. Недин В. В., Нейков О. Д. Борьба с пылью на рудниках. М., Недра, 1965.
16. Определение содержания вредных веществ при гидромоделировании вентиляционных процессов/А. Ф. Матросов, А. И. Корзон, А. С. Хатунцев и др. — В кн.: Оздоровление воздушной среды на предприятиях Свердловск, изд. ВНИИОТ ВЦСПС, 1974, с. 71—76.
17. Радченко Г. А. Обеспыливающее проветривание подземных выработок. Алма-Ата, Наука, 1970.
18. Совершенствование разработки и вентиляция рудников/С. И. Луговский, Э. И. Шкута, И. Б. Опшмянский и др. М., Недра, 1968.
19. Справочник по рудничной вентиляции. Под редакцией К. З. Ушакова. М., Недра, 1977.
20. Тимофеева О. Н. Вентиляция при кислородной и дуговой сварке сталей, алюминияевых и титановых сплавов. — Сварочное производство, 1962, № 12, с. 40—42.
21. Улаков К. Э., Бурчаков А. С., Медведев И. И. Рудничная аэрология. М., Недра, 1978.
22. Хейфиц С. Я., Балтайтис В. Я. Охрана труда и горноспасательное дело. М., М., Недра, 1978.
23. Яков А. П., Гащенко Б. С. Защита рудничной атмосферы от загрязнений. М., Недра, 1977.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Образование и распространение по выработкам пылевых аэрозолей при взрывных работах	5
1.1. Общие сведения	5
1.2. Пылевыведение при взрывании шпуровых зарядов ВВ	6
1.3. Пылевыведение при взрывании наружных зарядов ВВ	7
1.4. Распространение газопылевого облака по выработкам при взрывании наружных зарядов ВВ	8
2. Образование шахтных аэрозолей при непрерывных пылевыведениях	11
2.1. Образование пылевого аэрозоля в непроставляемой выработке	11
2.2. Влияние скорости воздушного потока на интенсивность пылевыведения	15
2.3. Влияние параметров свободной струи на интенсивность пылевыведения в тупиковой выработке	21
2.4. Интенсивность пылевыведения при одновременной работе нескольких бурильных машин	26
2.5. Влияние влажности горной массы на интенсивность пылевыведения при скреперовании и погрузке руды	27
2.6. Интенсивность пылевыведения в условиях многолетней мерзлоты	29
3. Осаждение и сдувание пыли в горных выработках	31
3.1. Общие сведения о переносе частиц турбулентным потоком	31
3.2. Осаждение пыли в шахтных выработках	33
3.3. Сдувание в выработках пыли вентиляционной струей	35
3.4. Интенсивность осаждения аэрозолей в шахтных выработках	37
3.5. Критическая скорость срыва и взаимосвязь сдувания пыли с запыленной поверхностью	42
4. Обеспыливающее проветривание сквозных выработок	50
4.1. Основные требования, предъявляемые к противопопыльным вентиляционным режимам	50
4.2. Допустимые по пылевому фактору скорости движения воздуха	51
4.3. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при взрывных работах	53
4.4. Определение расхода воздуха для проветривания при буровых работах	55
4.5. Расчет противопопыльных вентиляционных режимов при погрузке и скреперовании руды	58
4.6. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при электросварочных работах	64
4.7. Учет осаждения и сдувания пыли при расчете проветривания выработок	67
5. Рециркуляционное проветривание сквозных выработок	73
5.1. Вывод уравнения проветривания	73
5.2. Проветривание без обводной выработки с искусственной очисткой воздуха от пыли	77
5.3. Проветривание с обводной выработкой без искусственной очистки воздуха от пыли	81
5.4. Проветривание с обводной выработкой и искусственной очисткой воздуха от пыли	87

5.5. Экономическая оценка рециркуляционного способа проветривания	87
5.6. Расчет проветривания	89
6. Последовательное проветривание очистных блоков с временным аккумулярованием вредных примесей	97
6.1. Сущность способа проветривания	97
6.2. Уравнения проветривания аккумулярующей выработки по пылевому и газовому факторам	100
6.3. Выбор определяющего фактора для расчета проветривания	103
6.4. Определение предельной величины заряда ВВ для проветривания без регулирования воздухораспределения	105
6.5. Расчет проветривания	108
7. Обеспыливающее проветривание тупиковых выработок	117
7.1. Способы проветривания выработок при их проведении	117
7.2. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при взрывных работах	120
7.3. Определение количества воздуха, необходимого для проветривания при непрерывных пылевыведениях	126
7.4. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания при электросварочных работах	129
7.5. Выбор вентиляционного оборудования	131
8. Повышение эффективности обеспыливающего проветривания тупиковых выработок	134
8.1. Использование эжекционных насадок при нагнетательном проветривании	134
8.2. Повторное использование воздуха при всасывающем проветривании	143
8.3. Изменение режима работы вентилятора	154
8.4. Повышение эффективности комбинированного способа проветривания	164
8.5. Способ проветривания, исключающий опасное загрязнение исходящей струи	182
9. Пылевой контроль	192
9.1. Методы пылевого контроля	192
9.2. Приборы для измерения запыленности воздуха	193
9.3. Методики контроля запыленности воздуха	197
9.4. Пылевентиляционная служба на рудниках	198
Список литературы	199

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр. 139, строка 6-я сверху, формула (8.26)

Напечатано

$$n_{\min} = \frac{2F_0 \sqrt{\psi I_1} [1 + \delta\eta + \delta k_t (1 + \eta)] + n'}{k_t (1 + \delta\eta) (1,92a_1 d_0 + 0,4d_1^2) 1 + \delta\eta}$$

Следует читать:

$$n_{\min} = \frac{2F_0 \sqrt{\psi I_1} [1 + \delta\eta + \delta k_t (1 - \eta)]}{k_t (1 + \delta\eta) (1,92a_1 d_0 + 0,4d_1^2)} + \frac{n'}{1 + \delta\eta}$$

Стр. 149, строка 7-я снизу, формула (8.72)

Напечатано

$$n = a_1 n' + a_2 F_0 / Q_B + 1,62 a_2 \varphi_T e^2 F_0 / Q_B d_1^4$$

Следует читать:

$$n = a_1 n' + a_2 F_0 / Q_B + 1,62 a_2 \varphi_T e^2 F_0 Q_B / d_1^4$$

73 коп.

НЕДРА