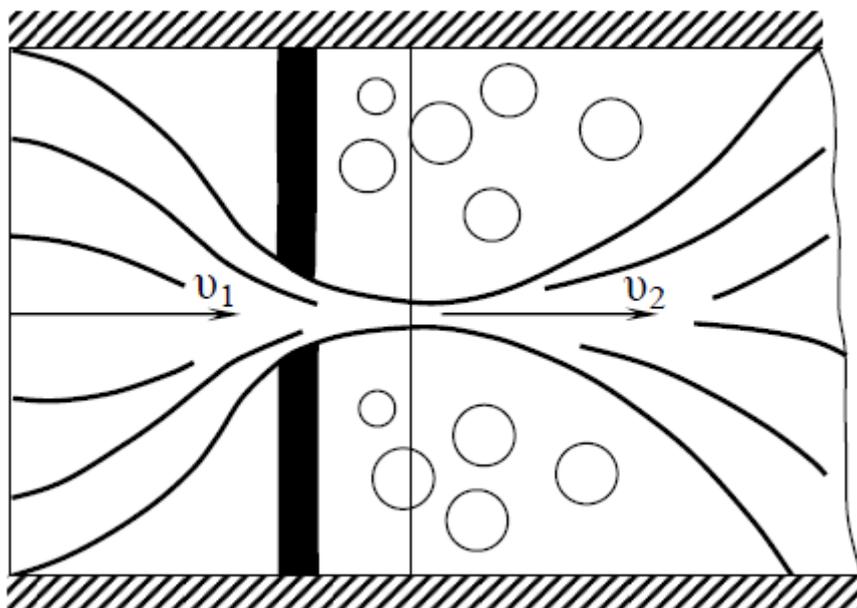




Л. А. Шевченко

# АЭРОЛОГИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

## УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Кемерово 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Л. А. Шевченко

# **АЭРОЛОГИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

Кемерово 2020

УДК 622.4(075.8)

Рецензенты:

Заведующий лабораторией «Горноспасательное дело» НИИ ГД, доктор технических наук, профессор В. Б. Попов;

Заместитель директора НЦ ВостНИИ по научной работе, доктор технических наук, профессор Ли Хи Ун.

Шевченко Л. А. Аэрология горных предприятий: учеб. пособие / Л. А. Шевченко; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2020. – 147 с.

ISBN 978-5-00137-118-2

Рассмотрены состав атмосферы выработок угольных шахт при нормальной работе и авариях, природа и механизм обычных и внезапных выделений метана. Изложены теоретические основы вентиляции шахт и проветривания выемочных участков. Описаны основные этапы проектирования вентиляции шахт и выбора главных вентиляторов.

Подготовлено по дисциплине «Аэрология горных предприятий» для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева.

УДК 622.4(075.8)

© Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 2020

© Шевченко Л. А., 2020

ISBN 978-5-00137-118-2

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Аэрология горных предприятий» направлена на подготовку горных инженеров в области аэрологической безопасности угольных шахт и содержит основные сведения о составе шахтной атмосферы, ее основные газовые компоненты, обусловленные современными технологиями угледобычи и средств транспорта. Отдельные разделы дисциплины посвящены вопросам образования метана в угольных пластах, видов его выделения в горные выработки и методом дегазации угольных шахт.

Горный инженер должен знать способы и схемы вентиляции шахт, основные законы аэромеханики воздушных потоков, режимы движения воздуха в горных выработках, виды их аэродинамического сопротивления и способы управления метановыделением из угольных пластов и выработанных пространств.

С учетом современных тенденций подземной угледобычи с использованием высокопроизводительной выемочной техники остро встает вопрос об ограничении поступления метана из разрабатываемого угольного пласта, включая поверхности обнажения массива и отбитый уголь, который является основным источником поступления газа в очистной забой и прилегающие выработки.

В результате изучения дисциплины студент должен иметь научное представление о неравномерности газовыделения в атмосферу горных выработок и учитывать ее при прогнозе аэрогазовой ситуации и расчете количества воздуха, необходимого для проветривания отдельных забоев и шахты в целом. Одновременно с этим студент должен уметь рассчитывать общешахтную депрессию, что в совокупности с расчетным значением количества воздуха позволит выбрать вентилятор главного проветривания шахты. Отдельная глава дисциплины посвящена вопросам газовой динамики шахт, законам фильтрации газа в угольных пластах и газовой выделению в дегазационные скважины, расчету основных параметров дегазационных систем.

Кроме вопросов аэро- и газовой динамики шахт рассматриваются мероприятия пылевого и газового режима, а также вопросы микроклимата в угольных шахтах на разных глубинах разработки и в разных климатических зонах. В учебном пособии содержатся некоторые справочные материалы из нормативных актов Ростехнадзора Российской Федерации.

## ВВЕДЕНИЕ

Аэрология горных предприятий – это отрасль горной науки, изучающая свойства рудничной атмосферы, законы движения воздуха в горных выработках, способы и схемы проветривания шахт, что в результате определяет безопасность ведения горных работ в условиях неуклонного роста угледобычи.

Рудничная атмосфера – это смесь газов как традиционных для атмосферы на поверхности земли, так и примесей, обусловленных химическим составом разрабатываемых полезных ископаемых и выделением машин и механизмов, работающих под землей. В результате возникает необходимость нормализации ее состава в части поддержания всех примесей в рамках ПДК и управления метано-выделением.

С необходимостью вентиляции шахт люди столкнулись давно. Первые сведения о вентиляции подземных выработок встречаются в работах Георгия Агриколы «Горное и заводское дело» (XVI век), М. В. Ломоносова «О вольном движении воздуха в рудниках примененном» (XVIII век). Однако первые исследования в области вентиляции шахт основывалось в основном на изучении движения воздуха под влиянием естественной тяги, что сдерживало развитие и интенсификацию горных работ. Со временем возникла необходимость использования механических средств побуждения движения воздуха. В 1832 году русским горным инженером А. А. Саблуковым был изобретен вентилятор, который на некоторое время позволил снять ограничения по газовому фактору на расширение масштабов горных работ. Однако с углублением шахт появилась опасность взрывов метановоздушных смесей, что требовало подавать все большее количество воздуха для вентиляции и поддержания безопасных концентраций метана.

В настоящее время абсолютная газообильность шахт составляет до  $100 \text{ м}^3/\text{мин}$  и более, что требует подачи в шахту больших количеств воздуха и, соответственно, мощных вентиляторов главного проветривания. Рост объемов подаваемого воздуха вызывает, в свою очередь, увеличение скоростей его движения по выработкам выемочных участков шахт зачастую превышающих допустимые значения, регламентируемые Правилами безопасности в угольных шахтах.

Возникшие противоречия потребовали приведения более детальных исследований аэрогазодинамики шахт на новом научном уровне. В XIX веке были выполнены исследования состава шахтной атмосферы, аэродинамического сопротивления горных выработок, теплового режима шахт, созданы приборы для соответствующих измерений. В начале XX века начинается интенсивное развитие рудничной аэрологии в России. Пионером в этой области явился А. А. Скочинский, опубликовавший в 1904 году свою работу «Рудничный воздух и основной закон движения его по выработкам». Им выполнены обширные исследования по рудничной аэрогазодинамике, внезапным выбросам угля и газа, эндогенным пожарам, рудничной пыли и др. В 1938 году по инициативе А. А. Скочинского был создан Институт горного дела АН СССР, существующий до настоящего времени.

Большой вклад в развитие рудничной аэрологии внесли также другие советские ученые М. М. Протодякопов, А. И. Ксенофонта, В. Б. Комаров, Ф. А. Абрамов, Л. Н. Быков, И. М. Печук, П. И. Мустель, Г. Д. Лидин, Л. А. Пучков, Н. О. Каледина, К. З. Ушаков, Б. Ф. Кирин, Б. Г. Тарасов, А. А. Мясников, В. А. Колмаков, Н. В. Ножкин, С. Г. Гендлер, Ф. С. Клебанов, Н. Г. Матвиенко и др.

В настоящее время коренным образом изменилась технология подземной угледобычи, практически на всех современных шахтах работают одна-две лавы, оборудованные высокопроизводительными очистными комплексами с высокими темпами подвигания забоя, что резко меняет подходы к проектированию вентиляции шахт и обеспечению аэрологической безопасности в целом. В этой связи возникает необходимость поиска нестандартных решений, направленных с одной стороны на повышение нагрузки на очистной забой, с другой – на преодоление неизбежно возникающего газового барьера. Изучение данной дисциплины будет способствовать обоснованному выбору эффективных решений вопросов проветривания шахт в будущей практической деятельности на горных предприятиях.

# 1. ШАХТНАЯ АТМОСФЕРА

## 1.1. Основные компоненты шахтной атмосферы

Атмосферный воздух – внешняя газообразная оболочка Земли. Состав сухого воздуха без влаги и пыли у земной поверхности составляет в объемных процентах:

- азот ( $N_2$ ) – 78,08;
- кислород ( $O_2$ ) – 20,96;
- углекислый газ ( $CO_2$ ) – 0,03;
- инертные газы – 0,93.

В атмосферном воздухе также могут содержаться водяной пар и механические примеси в виде пыли и частиц дыма. Шахтный воздух содержит дополнительные примеси, к которым относятся: метан, углекислый газ, сернистый газ, оксиды азота, сероводород, водород, оксид углерода, а также компоненты отработавших газов дизельных двигателей, используемых на монорельсовом транспорте. Наиболее токсичными из них являются: сероводород, сернистый газ, оксид углерода, акролеин. При наличии примесей в шахтной атмосфере соответственно уменьшается содержание кислорода.

Рассмотрим свойства и влияние на организм человека главных составных частей рудничного воздуха.

Кислород ( $O_2$ ) – газ без цвета, вкуса и запаха, относительная плотность (по отношению к плотности воздуха) 1,11, необходим для дыхания и горения. При этом образуется углекислый газ, выдыхаемый в атмосферу. Согласно Правилам безопасности в угольных шахтах содержание кислорода в шахтной атмосфере в действующих выработках должно быть не менее 20 %. Недостаток кислорода вызывает общую слабость и ослабление умственной деятельности, при 17 % появляются одышка и учащение сердцебиения, при 12 % воздух смертельно опасен.

В непроветриваемых выработках при взрывах метана и угольной пыли, при пожарах содержание кислорода может снизиться до 1–3 %. При вдыхании такого воздуха человек теряет сознание через 1 минуту, а через 5 минут наступает клиническая смерть.

Азот ( $N_2$ ) – газ без цвета, вкуса и запаха, относительная плотность 0,97. Поступает из угля и пород, образуется также при взрывных работах. Его вред заключается в снижении содержания кислорода.

Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) – газ без цвета со слабокислым вкусом. Относительная плотность 1,52, в результате чего скапливается у почвы выработок. При содержании углекислого газа до 1,5 % человек не ощущает никаких изменений, при 5 % частота дыхания возрастает, при 6 % появляется сильная одышка и слабость, при 10 % и выше наступает обморочное состояние, а при 20 % – смертельное удушье через несколько секунд.

Основные источники образования углекислого газа: окислительные процессы органических материалов и крепежного леса, выделение из горных пород, взрывы метана, угольной пыли, пожары. Предельно допустимая концентрация углекислого газа в рудничном воздухе составляет: на рабочих местах и в исходящих струях участков – 0,5 %; в исходящих крыла, горизонта, шахты – 0,75 %. Наиболее углекислотообильными в свое время были шахты Подмосковского бассейна.

Оксид углерода (CO) – газ без цвета, вкуса и запаха, относительная плотность 0,97, горит и взрывается в воздухе при концентрации от 12,5 до 75 %. Весьма ядовит, в 300 раз активнее, чем кислород соединяется с гемоглобином крови, в результате чего кровь утрачивает способность газообмена. Достаточно вдохнуть  $300 \text{ см}^3$  оксида углерода, чтобы он полностью насытил кровь человека. При слабом отравлении наблюдаются головная боль, шум в ушах, головокружение, учащение сердцебиения. При сильном отравлении, кроме вышеуказанных симптомов, теряется способность двигаться и притупляется сознание. Смертельное отравление наступает при концентрации оксида углерода более 1 % после нескольких вдохов. Основные источники: взрывы, пожары, работа двигателей внутреннего сгорания. Предельно допустимая концентрация – 0,0017 %.

Оксиды азота (оксид NO – бесцветный газ, диоксид  $\text{NO}_2$  – бурый газ, пятиоксид  $\text{N}_2\text{O}_5$ ) имеют характерный резкий запах, относительная плотность более единицы. Весьма ядовиты, вызывают раздражения дыхательных путей и глаз, а в тяжелых случаях – отек легких. Токсическое действие наступает не сразу, а спустя 4–6 ч, иногда через 20–30. Симптомы отравления: кашель, головная боль, рвота, синюшность, повышение температуры, расстройства сердечной деятельности. Смерть наступает при кратковременном вдыхании концентрации оксидов азота 0,025 %. Допустимая концентрация в шахтном воздухе 0,00025 %.

Сернистый газ ( $\text{SO}_2$ ) – газ без цвета, с сильным раздражающим запахом и кислым вкусом. Относительная плотность по отношению к воздуху 2,22, образуется при пожарах, выделяется из горных пород и угольных пластов (характерно для месторождений Донбасса). Весьма ядовит, раздражает дыхательные пути и глаза, в тяжелых случаях вызывает воспаление бронхов, отеки гортани и легких. Смертельно опасная концентрация 0,05 %. Предельно допустимая концентрация – 0,00038 %.

Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – газ без цвета, со сладковатым вкусом и запахом тухлых яиц, плотность по отношению к воздуху 1,19, выделяется из горных пород и минеральных источников, при гниении органических веществ, при пожарах и взрывных работах. Горит, а при содержании в воздухе 6 % взрывается. Очень ядовит. Симптомы отравления: раздражение и жжение в глазах и дыхательных путях, усталость, тошнота, рвота, обморок. Смертельное отравление при содержании 0,1 %. Предельно допустимая концентрация – 0,00070 %.

Водород ( $\text{H}_2$ ) – газ без цвета, вкуса и запаха, относительная плотность 0,07. Горит и взрывается при содержании в воздухе от 4 до 74 %. Температура воспламенения 300–600 °С. Выделяется из пород и угля средней степени метаморфизма, при зарядке аккумуляторных батарей электровозов. Допустимая концентрация составляет 0,5 %.

Метан ( $\text{CH}_4$ ) – газ без цвета, вкуса и запаха, относительная плотность 0,554. Не ядовит, но вызывает удушье при концентрации около 25 % за счет вытеснения из воздуха кислорода. При содержании метана в воздухе до 5 %, он горит около источника тепла, в диапазоне от 5 до 15 % взрывается, а более 15 % не взрывается, но может гореть при притоке кислорода извне. Максимальная сила взрыва наблюдается при концентрации 9,5 %. Выделяется из угольных пластов и вмещающих пород. Метан химически инертен, слабо растворим в воде (три объема метана на сто объемов воды). Сопутствующие углеводороды (этан, пропан, бутан, пентан, гексан) обладают легким наркотическим действием. Постоянное и продолжительное их вдыхание в процессе работы в шахте ослабляет умственную деятельность и может отразиться на потомстве. Предельно допустимое содержание метана в шахтной атмосфере (табл. 1.1). Более подробно о метане в следующем параграфе.

Таблица 1.1

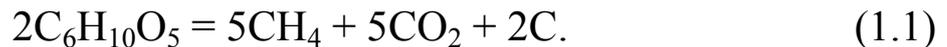
**Допустимая концентрация метана в атмосфере  
действующих горных выработок и трубопроводах**

Вентиляционная струя, трубопровод	Допустимая концентрация метана, % (по объему)
В лавах и тупиковых горных выработках, камерах, в горных выработках выемочного участка, поддерживаемых горных выработках и исходящих из них	1
Исходящая крыла, шахты	0,75
Поступающая на выемочный участок, в лавы, к забоям тупиковых горных выработок и в камеры	0,5
Местные скопления метана в горных выработках	2
На выходе из смесительных камер	2
Трубопроводы для изолированного отвода метана, газодренажные горные выработки	3,5
Дегазационные трубопроводы	До 3,5 и более 25
Изолированные горные выработки, выработанные пространства	Не регламентируется

### **1.2. Метан**

Процесс образования метана протекал одновременно с формированием пластов угля. В предыдущие геологические периоды при влажном и теплом климате на Земле бурно развивалась растительность. При ее отмирании в воде озер и болот при весьма малом доступе воздуха в огромном количестве накапливалось торфянистое материнское вещество в виде пластовых залежей, покрывалось глинами и песком и погружалось на глубину. Под действием повышенной температуры и давления (на каждые 100 м погружения в земную кору температура повышалась в среднем на 3 °С, а давление – на 2,5 МПа) материнское вещество подвергалось метаморфизму – процессу изменения химического состава и физических свойств. Постепенно в этом органическом веществе возрастало содержание углерода и одновременно снижалось содержание водорода, кислорода, углекислого газа и воды. Вещество становилось плотным, пористым, хрупким и превращалось в ископаемый уголь. При малом метаморфизме образовывался наиболее молодой бурый уголь, а при среднем – каменный уголь и при большем – антрацит.

Происходил так называемый процесс карбонизации (обогащения углеродом), при котором из 1 т торфянистого вещества, при его превращении в бурый уголь, выделялось 265–465 м<sup>3</sup> метана, а из 1 т бурого угля при превращении в каменный уголь – 100–200 м<sup>3</sup>, т. е. в сумме от 365 до 665 м<sup>3</sup>. Образование метана в процессе превращения растительных остатков – целлюлозы (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>) в углистое вещество с выделением метана CH<sub>4</sub> и углекислого газа CO<sub>2</sub> можно описать следующей формулой:



Образованию метана способствовали анаэробные бактерии, вызывающие метановое брожение органического вещества без доступа кислорода. В процессе метаморфизма постепенно формировалась макромолекула каменного угля C<sub>28</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub> (рис. 1.1).

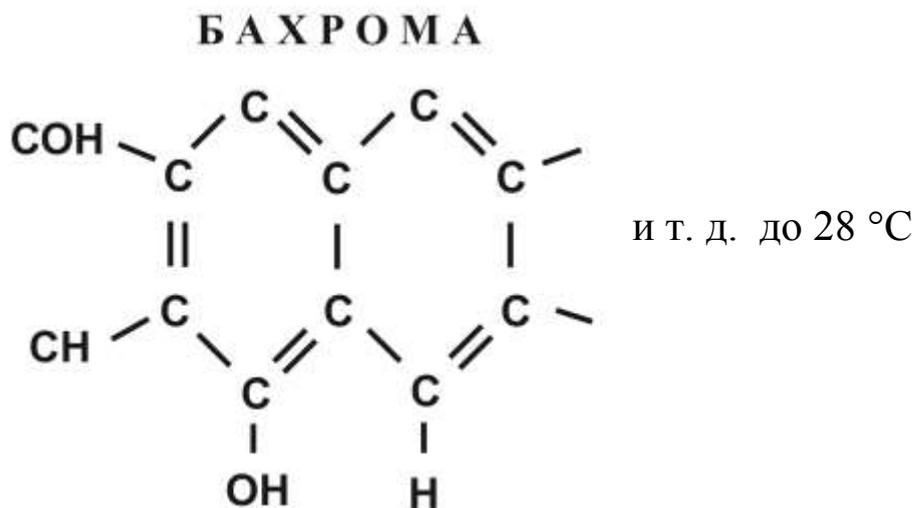


Рис. 1.1. Часть макромолекулы каменного угля средней степени метаморфизма C<sub>28</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>

Она представляет плоское образование из подсоединенных друг к другу колец из шести атомов углерода С – ядро, на периферии которого располагаются атомы и группы Н, ОН, СН, СОН – бахромы, активная к окислительным процессам (включая наиболее быстрое окисление – взрыв). Чем больше бахромы, тем более уголь склонен к самовозгоранию, а пыль такого угля – более взрывчатая. По мере метаморфизма ископаемого угля доля бахромы снижается. Она максимальна у бурого угля и почти исчезает у антрацита. Этим и объясняется, что антрациты не самовозгораются и их пыль невзрывчатая, а максимальной пожаровзрывоопасностью характери-

зуются бурые угли. В метаморфическом ряду каменных углей их пожаровзрывоопасность снижается от марок Г, Д (газовые, длиннопламенные) к марке Т (тощие угли).

Если проникнуть в микроструктуру угля за пределы самых мелких угольных пор с радиусом менее 5 мкм, то увидим плоские макромолекулы угля в виде дисков. Упакованные в стопки эти диски образуют кристаллиты. Группы расположенных рядом кристаллитов создают мицеллы (рис. 1.2). Такую структуру называют мицеллярной.



Рис. 1.2. Мицеллярная микроструктура каменного угля

В угольных пластах метан находится в трех агрегатных состояниях: газообразном – свободный газ, заполняющий объем угольных пор и трещин; сорбированном – химически связанный метан на поверхности угольных пор и в промежутках между макромолекулами, который формируется при большом давлении; твердом – газогидратные соединения метана с водой при низких температурах, которые могут иметь место в условиях многолетней мерзлоты.

Для угольных шахт практическое значение имеют сорбированный метан. На существующих глубинах разработки до 97–98 % метана заключено в угольных пластах в сорбированном состоянии и лишь 2–3 % – в свободном. Во вмещающих угольные пласты породах также может находиться небольшое количество метана, однако учитывая низкие сорбционные свойства пород, его количество в них невелико.

При снижении давления в угольных пластах происходит обратный процесс – десорбция, т. е. выделение метана из угля, что является главным источником поступления газа в горные выработки

при ведении очистных и подготовительных работ в шахтах. Общий объем метана, который может поглотить 1 т угля в природном состоянии может достигать до 40 и более м<sup>3</sup>. Данный показатель называется природной газоносностью угольного пласта, которую определяют при геологической разведке месторождения.

Температура воспламенения метановоздушной смеси 650–850 °С. Источниками взрыва являются электрическая дуга короткого замыкания, при котором температура может достигать до 4000 °С, фрикционное искрение с температурой до 1200 °С, взрывные работы с температурой в очаге взрыва до 4500 °С. Воспламенению метана предшествует индукционный период продолжительностью до 1 с, в течение которого газ должен нагреться до необходимой температуры воспламенения. Это свойство метана используется при создании предохранительных взрывчатых веществ, систем быстрогодействия отключения электроэнергии при достижении концентрации метана критических значений (более 1 %).

Взрыв метана в шахтах вызывает прямой и обратный удары. Прямой удар представляет собой взрывную волну, направленную от источника взрыва к периферии. Обратный удар представляет собой волну, направленную к центру взрыва вследствие возникающего там разрежения после остывания продуктов взрыва.

Как отмечалось выше, метановоздушная смесь взрывается при содержании метана в ней от 5 до 15 %. Однако, при определенных условиях это соотношение может изменяться в ту или иную сторону в зависимости от концентрации кислорода в атмосфере. В связи с этим существует понятие «треугольника взрываемости» метановоздушной смеси, представляющего собой графическое представление о возможности взрыва при различных комбинациях сочетаний концентрации метана и атмосферного кислорода (рис. 1.3).

При наличии метана снижается нижний предел взрывчатой концентрации угольной пыли: 1 % метана в пылегазовом облаке – в 2 раза; 2 % метана (допустимо в забое) – в 4 раза. Например, для слабо взрывчатой пыли угля марки Т указанный предел в забое может снизиться со 150 до 38 г/м<sup>3</sup>. Замеры показывают, что при работе горных машин и комплексов без средств пылеподавления запыленность шахтного воздуха у комбайна может достигать 1,5–40 г/м<sup>3</sup>, на исходящих потоках очистных выработок –

до  $10 \text{ г/м}^3$ , на вентиляционных штреках в 10–15 м от забоев лав – до  $5 \text{ г/м}^3$ . Таким образом, проблема борьбы с метаном должна решаться в комплексе с разработкой и применением эффективных способов и средств снижения пылеобразования и пылевыведения.



Рис. 1.3. Пределы взрываемости смеси метана с воздухом (треугольник взрываемости)

### ***1.3. Метаноносность угольных пластов и метанообильность горных выработок***

Различают природную и остаточную метаноносность угольных пластов. Природная метаноносность угольного пласта – объем метана, содержащегося в единице массы угля в природном состоянии. Обычно этот показатель относят к одной тонне угля. Для расчетов учитывается сухая беззольная масса угля и метаноносность оценивается как объем метана, содержащегося в одной тонне сухой беззольной массы ( $\text{м}^3/\text{т с.б.м.}$ ). Остаточная метаноносность – это объем газа, содержащегося в 1 т угля после воздействия на угольный пласт в виде подработки или надработки, дегазации, а также в отбитом угле.

Природная метаноносность определяется прямым методом путем отбора угольных кернов без потерь метана при перебурировании пласта скважинами с земной поверхностью с помощью гермети-

ческих керногазонаборников и последующего измельчения и вакуумирования кернов. По данным кернового опробования пласта строится карта его метаноносности с помощью изогаз – линий равной газоносности (метаноносности). Без такой карты не может быть начато проектирование строительства шахты.

Остаточная метаноносность определяется прямыми методами путем отбора угольных кернов вблизи выработок шахтными керногазонаборниками или путем отбойки проб угля с забоя, со стенок выработки, из отбитого угля в герметические сосуды и последующего измельчения и вакуумирования проб.

Поскольку определение природной газоносности герметическими керногазонаборниками – процесс весьма трудоемкий, приходится во многих случаях этот процесс упрощать, используя обычные колонковые трубы (снаряды), испытатели пластов на давление газа и температуры, стальные колбы и термовакуумные установки и допуская равенство значений природной и потенциальной газоносности перебуриваемых геологоразведочными скважинами угольных пластов. Газоносность пласта можно также определить расчетным путем, пользуясь табличными данными пористости угля и выхода летучих.

Существует также понятие газоемкость угля при определенном давлении. Это объем газа, который может поглотить единица массы угля при разных значениях давления, создаваемого искусственно в лабораторных условиях. В этом случае объем сорбированного метана в угле  $x_{\text{сорб}}$  оценивается уравнением Лэнгмюра:

$$x_{\text{сорб}} = \frac{abP}{1 + bP}, \quad (1.2)$$

где  $a, b$  – константы сорбции, зависящие от степени метаморфизма угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ ,  $1/\text{Па}$ ;  $P$  – давление газа, Па.

Графически данная зависимость может быть выражена кривой на рис. 1.4.

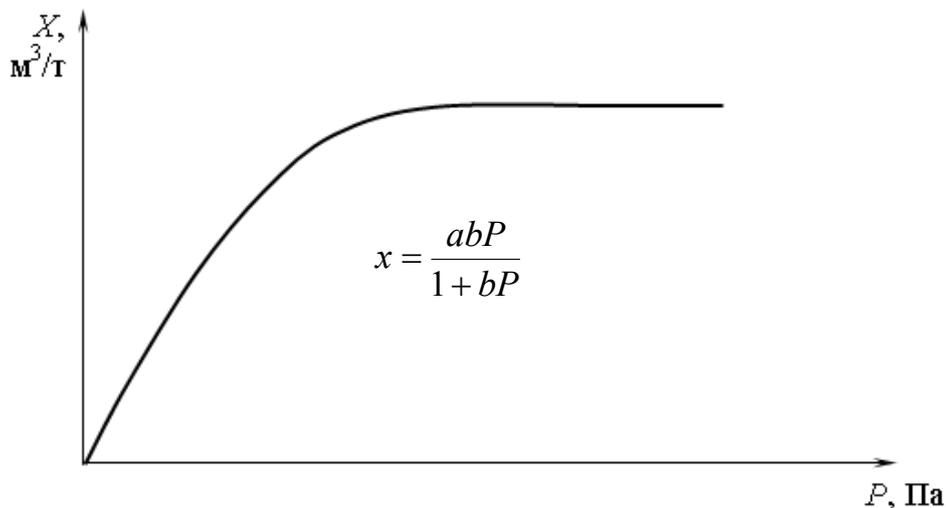


Рис. 1.4. Зависимость газоемкости угля от давления (кривая Лэнгмюра)

Объем свободного метана  $x_{\text{св}}$  определяется по уравнению Бойля – Мариотта:

$$x_{\text{св}} = \frac{mP}{RP_1}, \quad (1.3)$$

где  $m$  – пористость угля,  $\text{см}^3/\text{г}$ ;  $P, P_1$  – давление газа в пласте и атмосферное давление,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ;  $R$  – коэффициент сжимаемости метана.

По газоносности пластов устанавливают запасы заключенного в них метана, целесообразность и необходимость выполнения дегазационных работ, метановыделение из пластов в горные выработки, верхние границы области метановых газов и др. Например, по разности природной и остаточной газоносности рассчитывают объем выделяющегося метана и расход свежего воздуха для проветривания действующих горных выработок.

Метанообильность горных выработок характеризуется объемом метана, поступающего в горные выработки из всех возможных источников газовыделения. Различают абсолютную метанообильность – объем метана, поступающего в горную выработку и в единицу времени ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) и относительную – объем метана, приходящегося на 1 т суточной добычи ( $\text{м}^3/\text{т с.д.}$ ).

По абсолютной метанообильности рассчитывают количество воздуха, необходимое для проветривания забоя или шахты в целом, а по величине относительной метанообильности устанавливается категория шахты по газу. В соответствии с Правилами безопасно-

сти в угольных шахтах установлены следующие категории шахт по газу (метану или диоксиду углерода) (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Категории шахт по газу (метану или диоксиду углерода)

Категория шахт по газу (метану или диоксиду углерода)	Относительная газообильность, м <sup>3</sup> /т
Негазовые	Метан или диоксид углерода не выявлены
Газовые	
I	До 5
II	От 5 до 10
III	От 10 до 15
Сверхкатегорные	15 и более, суфлярные выделения
Опасные по внезапным выбросам угля (породы) и газа	Пласты, опасные по внезапным выбросам угля (породы) и газа

Категория шахты по газу устанавливается ежегодно в начале каждого последующего года по результатам замеров относительной газообильности шахты предыдущего года. В Кузбассе большинство шахт относятся к III категории или сверхкатегорным, в которых устанавливается газовый и пылевой режимы, а также дополнительные требования безопасности при выполнении подземных горных работ.

#### 1.4. Виды выделения метана в шахтах

В газовых шахтах различают следующие виды выделения метана из угольных пластов:

– обыкновенное – это фильтрация метана через поверхности обнажения угольного пласта в режиме плавного истечения, затухающего во времени. Обычное (спокойное) выделение метана с обнаженной поверхности пласта подчиняется закону Дарси. Проницаемость пласта в области влияния выработки – величина переменная. Она максимальна на забое и снижается в глубину массива. В каждый момент времени скорость фильтрации газа  $v_x$  на расстоянии  $x$  от обнаженной поверхности пропорциональна газопроницаемости

пласта  $k_x$  и перепаду давления газа  $\frac{dP}{dx}$ , т. е.

$$v_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{dP}{dx}, \quad (1.4)$$

где  $\mu$  – вязкость газа, Па·с;  $P$  – давление газа в области влияния выработки, Па;

– суфлярное – поступление метана в горные выработки через трещины или каналы из газовых коллекторов, находящихся в толще горных пород в виде концентрированных газовых потоков. Суфляры могут действовать длительное время в зависимости от объема газового коллектора;

– газовыделение из отбитого угля в очистном или подготовительном забое, которое в настоящее время является основным источником метана в выработки. Интенсивность данного источника зависит от производительности очистного или проходческого комбайнов и массы отбитого угля, поступающего в атмосферу очистного или подготовительного забоя;

– газовыделение из выработанного пространства. Формируется за счет поступления метана из смежных угольных пластов (надрабатываемых или подрабатываемых рабочим пластом) в результате их разгрузки от горного давления, создающей условия для раскрытия трещин и снижения газового давления в смежных пластах. В настоящее время ввиду большой скорости подвигания очистного забоя данный источник газовой выработки оказывает незначительное влияние на общий газовый баланс выемочного участка;

– внезапное выделение метана из угольного пласта (внезапный выброс угля и газа) – это опасное газодинамическое явление, заключающееся в лавинообразном выбросе газа вместе с угольной мелочью из очага, приуроченного к геологическому нарушению в угольном пласте, находящегося под большим давлением. При вскрытии данного очага горной выработкой, как правило, подготовительной, происходит резкий сброс давления в данном очаге, лавинообразная десорбция метана из угля, в результате чего многократно повышается его объем, который выбрасывается в горную выработку, засыпая ее на сотни метров угольной мелочью вместе с оборудованием и людьми. Данное явление по своим последствиям относится к аварийным ситуациям, сопоставимым с взрывами метановоздушной смеси в угольных шахтах.

Внезапные выбросы угля и газа наблюдаются, начиная с опре-

деленной глубины разработки угольных пластов, которые в каждом угольном бассейне различны. В Кузбассе эти глубины могут начинаться с 200–250 м в зависимости от района. Если на шахте когда-либо наблюдался внезапный выброс, то она в соответствии с Правилами безопасности автоматически относится к категории шахт опасных по внезапным выбросам угля и газа.

### ***1.5. Газовый баланс угольных шахт***

Газовым балансом шахты называется ее абсолютная газообильность, представленная в виде суммы газообильностей отдельных источников метановыделения. Он зависит от системы разработки угольного пласта и его природной газоносности, способа управления кровлей, наличия смежных пластов и, что в настоящее время наиболее важно, от производительности очистного забоя и скорости его подвигания.

С учетом современных тенденций подземной угледобычи, характеризующихся применением высокопроизводительных выемочных комплексов, способных обеспечивать до 30–40 тыс. тонн угля в сутки, основным элементом газового баланса шахт становится сам разрабатываемый пласт в виде отбитого угля и газовыделения с обнаженных поверхностей как в очистных, так и в подготовительных забоях. При этом значительно сокращается газовыделение из выработанных пространств ввиду их существенного отставания от линии очистного забоя, что соответственно снижает долю поступления газа из смежных пластов-спутников.

Следует также учитывать и то, что в современных шахтах, как правило, в работе находится только один очистной забой и один находится в подготовке. В двухкрылых панелях может одновременно работать два очистных забоя и два находиться в стадии подготовки. Таким образом, практически газовый баланс шахты будет формироваться из следующих основных составляющих дебита метана: отбитый уголь в очистных и подготовительных забоях, обнаженные поверхности, создаваемые очистным и проходческим комбайнами, выработанное пространство за лавой, а также возможны в редких случаях суфлярные и другие источники поступления метана в атмосферу шахт.

При расчете общего газового баланса шахты все составляющие суммируются и определяется абсолютная газообильность шах-

ты в целом, что в последствии используется для расчета необходимого количества воздуха и выбора главного вентилятора. При этом необходимо учитывать особенности современных технологий угледобычи, характеризующихся непостоянством газовыделения из всех вышеупомянутых источников и, особенно, из отбитого угля. Объем выделяющегося метана из данного источника зависит от фазы технологического цикла работы комбайна в лаве и может изменяться от нуля в начале цикла до максимального значения в конце цикла, когда масса свежесбитого угля на лавном конвейере может достигать 40–50 тонн.

Необходимо заметить, что результаты расчетов газового баланса отдельных выработок и шахты в целом, могут существенно отличаться от фактических значений ввиду сложности учета влияющих на них факторов. В связи с этим необходимо все результаты расчетов проверять по данным газовой съемки в шахтах. В настоящее время расчет газообильности шахт осуществляется на основании «Руководства по расчету количества воздуха для проветривания угольных шахт».

### ***1.6. Прогноз газообильности шахт***

Прогноз газообильности угольных шахт осуществляется на стадии их проектирования для обоснования расчетного количества воздуха и выбора вентилятора главного проветривания. Ввиду большого количества факторов, влияющих на выделение метана в горные выработки разного назначения, рассчитанные значения абсолютной газообильности шахты следует рассматривать как ориентировочные, подлежащие впоследствии проверке на реальном объекте.

Прогноз газообильности шахты осуществляется по данным прогноза газоносности угольных пластов и вмещающих пород. Для пользования этим методом необходимо иметь геологические разрезы разрабатываемой угольной толщи, карты газоносности угольных пластов и вмещающих пород, данные технического анализа угля и определиться со схемами и технологией подготовки и отработки пластов. Структура газового баланса шахты складывается в виде суммы относительной газообильности разрабатываемых шахтопластов:

$$q_{\text{ш}} = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{\text{ш.}i} A_{\text{ш.}i})}{\sum_{i=1}^n A_{\text{ш.}i}}, \quad (1.5)$$

где  $A_{\text{ш.}i}$  – добыча угля с  $i$ -го шахтопласта, т;  $n$  – число разрабатываемых шахтопластов на шахте.

Относительная газообильность разрабатываемого шахтопласта определяется как сумма относительного газовыделения из выемочных участков  $q_{\text{уч}}$ , подготовительных выработок  $q_{\text{п.в}}$  и старого выработанного пространства (ранее отработанных этажей или горизонтов)  $q_{\text{ст}}$ , м<sup>3</sup>/т:

$$q_{\text{ш}} = q_{\text{уч}} + q_{\text{п.в}} + q_{\text{ст}}. \quad (1.6)$$

Относительная газообильность выемочного участка определяется как сумма относительного газовыделения из разрабатываемого пласта  $q_{\text{пл}}$ , пластов-спутников  $q_{\text{п.с}}$  и вмещающих пород  $q_{\text{п}}$ , м<sup>3</sup>/т:

$$q_{\text{уч}} = q_{\text{пл}} + \sum q_{\text{п.с}} + q_{\text{п}}. \quad (1.7)$$

Относительная газообильность подготовительной выработки определяется как сумма относительного метановыделения из обнаженных неподвижных поверхностей пласта со стенок выработки, из отбитого угля и с поверхности забоя:

$$q_{\text{п.в}} = \frac{I_{\text{н.п}} + I_{\text{у.з}}}{A_{\text{п.в}}}, \quad (1.8)$$

где  $I_{\text{н.п}}$  – абсолютное метановыделение из обнаженных неподвижных поверхностей пласта, м<sup>3</sup>/сут;  $I_{\text{у.з}}$  – абсолютное метановыделение из отбитого угля и с поверхности забоя, зависящие от газоносности пласта и скорости подвигания выработки, м<sup>3</sup>/сут;  $A_{\text{п.в}}$  – добыча угля в подготовительной выработке, т/сут.

В общем виде входящие в выражения (1.5), (1.6), (1.7) величины определяются по следующим формулам:

Относительное метановыделение из разрабатываемого пласта  $q_{\text{пл}}$ , м<sup>3</sup>/т (для возвратноточной схемы проветривания):

$$q_{\text{пл}} = R_{\text{с.р}}(X - X_1) + R_{\text{ц}}(X - X_{\text{ост}}), \quad (1.9)$$

где  $X$  – природная метаноносность разрабатываемого пласта, м<sup>3</sup>/т;  
 $X_1$  – остаточная метаноносность выдаваемого из участка угля, м<sup>3</sup>/т;  
 $X_{\text{ост}}$  – остаточная метаноносность угля в оставленном целике, м<sup>3</sup>/т,  
 $R_{\text{с.р}}, R_{\text{ц}}$  – коэффициенты, учитывающие влияние на метановыделение соответственно системы разработки и оставленных в выработанном пространстве целиков угля.

Относительное метановыделение из пласта-спутника определяется из выражения:

$$q_{\text{п.с}} = R_1 \left( \frac{m_{\text{п.с}}}{m_{\text{в}}} \right) (X_{\text{п.с}} - X_{\text{ост.п.с}}) \left[ 1 - \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \right], \quad (1.10)$$

где  $R_1$  – коэффициент, учитывающий влияние на метановыделение скорости подвигания очистного забоя и системы разработки;  $m_{\text{п.с}}$  – мощность пласта-спутника, м;  $m_{\text{в}}$  – вынимаемая полезная мощность разрабатываемого пласта, м;  $X_{\text{п.с}}, X_{\text{ост.п.с}}$  – соответственно природная и остаточная метаноносность пласта-спутника, м<sup>3</sup>/т;  $H_1$  – расстояние по нормали между пластами, м;  $H_2$  – расстояние, при котором метановыделение из пласта-спутника равно нулю, м.

Относительное метановыделение из вмещающих пород:

$$q_{\text{п}} = R_2 (X - X_{\text{ост}}) \quad (1.11)$$

или

$$q_{\text{п}} = R_3 X_{\text{п}} \frac{X_{\text{п}} m_{\text{в.п}}}{\gamma m_{\text{в}}}, \quad (1.12)$$

где  $R_2$  – коэффициент, учитывающий способ управления кровлей, скорость подвигания забоя, глубину разработки и выход летучих из угля;  $R_3$  – коэффициент, учитывающий кратность обрушения пород кровли;  $X_{\text{п}}$  – средняя метаноносность обрушающихся пород, м<sup>3</sup>/т;  $\gamma_{\text{п}}, \gamma$  – средняя плотность соответственно обрушающихся пород и угля, т/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{в.п}}$  – вынимаемая мощность пласта с учетом породных прослоек, м.

Относительная газообильность старого выработанного пространства:

$$q_{\text{ст}} = R_4 (q_{\text{уч}} + R_5 q_{\text{п.в}}), \quad (1.13)$$

где  $R_4$  – коэффициент, учитывающий условия примыкания вентиляционных выработок к старому выработанному пространству;  $R_5$  – коэффициент, учитывающий способ подготовки выемочного участка.

Значения коэффициентов, входящих в приведенные выше выражения, берутся из таблиц или графиков. Коэффициенты уточняются по мере накопления экспериментальных и опытных данных. Но структура выражений для прогноза метанообильности горных выработок в принципе остается неизменной. Необходимо заметить, что данный метод прогноза газообильности шахты в настоящее время потерял свою актуальность и приводится в данном учебном пособии в связи с тем, что он базируется на основных положениях Руководства по расчету количества воздуха для проветривания угольных шахт, которое в настоящее время является действующим.

В практике проектирования и эксплуатации угольных шахт допускается применение метода прогноза газообильности очистных и подготовительных забоев с использованием данных по аналогичным объектам, работающим в непосредственной близости от проектируемых на этом же пласте, называемым аналогами.

Ранее в практике эксплуатации угольных месторождений использовался так называемый горно-статистический метод прогноза газообильности шахты. Он применяется для проектирования новых горизонтов действующих шахт или для новых шахт, находящихся рядом с действующими при идентичных горно-геологических условиях. По падению пластов данный метод прогноза возможен до 100–200 м по вертикали, но не более 600 м. По простиранию пластов прогноз дается на длину одного шахтного поля, примыкающего к действующей шахте.

Предполагаемая относительная метанообильность горных выработок на глубине  $H$  м определяется по формулам:

$$q_H = \frac{H - H_0}{H_M} + 2 \quad (1.14)$$

или

$$q_H = \frac{H - H_2}{H_M} + q_2, \quad (1.15)$$

где  $H_0$  – глубина зоны метанового выветривания, м;  
 $H_M = \frac{H_2 - H_1}{q_2 - q_1}$  – ступень метанообильности, м/т;  $H_1, H_2$  – расстояние по вертикали от земной поверхности соответственно до ближайших вышележащего и нижележащего горизонтов в зоне метановых газов, м;  $q_1, q_2$  – фактическая средняя относительная метанообильность горных выработок соответственно на глубинах  $H_1$  и  $H_2$ , м<sup>3</sup>/т (рис. 1.5).

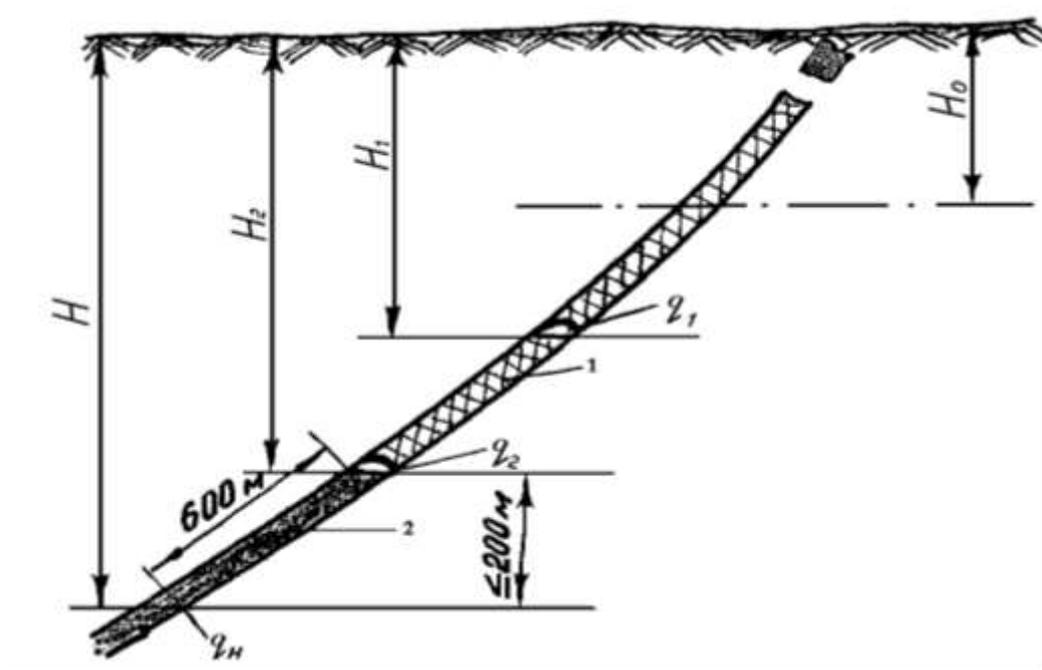


Рис. 1.5. Схема к прогнозу газообильности выработок горностатистическим методом: 1, 2 – соответственно отработанные и планируемые к отработке части пласта;  $H_1, H_2$  – соответственно глубина залегания ближайших верхнего и нижнего отработанных горизонтов;  $q_1, q_2$  – соответствующая  $H_1$  и  $H_2$  средняя фактическая газообильность выработок;  $q_n$  – прогнозируемая газообильность выработок на глубине  $H$

При известной  $H_M$ , моноклиральном залегании пластов и экстраполяции вниз не более чем на 200 м глубина зоны метанового выветривания  $H_0$ , м, может быть определена по формуле

$$H_0 = H_1 - H_M(q_1 - 2). \quad (1.16)$$

Данный метод также является приближенным и пригоден в условиях, когда шахта отработала не менее двух горизонтов и готовится к переходу на третий.

## *1.7. Газовый режим угольных шахт*

Газовый режим угольных шахт представляет собой совокупность организационных и технических мероприятий, направленных на снижение газовыделения в горные выработки, недопущения источников огня и высокой температуры в шахтной атмосфере и локализацию взрывов метановоздушной смеси. Газовый режим вводится при обнаружении метана в одной из выработок, после чего шахте присваивается определенная категория по газу.

К организационным мероприятиям относятся:

- выбор способа и схемы проветривания;
- замена контактных электровозов на аккумуляторные или использование монорельсового транспорта;
- использование только предохранительных ВВ и введение особого режима для взрывных работ;
- применение автоматических систем контроля содержания метана в горных выработках и индивидуальных сигнализаторов метана, встроенных в головные светильники;
- введение изолирующих самоспасателей при обязательном наличии пунктов их замены, если время эвакуации превышает время работы самоспасателей;
- особый режим работы очистного комбайна в лаве с целью контроля массы отбитого угля, находящегося на лавном конвейере, являющимся основным источником метана как в очистной забой, так и в конвейерные выработки;
- обязательное периодическое проведение обучения и аттестации инженерно-технических работников всех уровней по промышленной безопасности.

К числу организационных мероприятий также можно отнести создание на шахте специальных служб: профилактических работ, прогноза горных ударов и внезапных выбросов угля и газа, дегазации и др.

К техническим мероприятиям относятся:

- повышение уровня взрывозащиты электрооборудования (РН, РП, РВ, РО);
- увлажнение угольных пластов;
- дегазация угольных пластов, имеющих природную газоносность более  $13 \text{ м}^3/\text{т}$ ;

- локальный прогноз выброса опасности угольных пластов (для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа);
- изолированный отвод метана, поступающего из суфляров в горных выработках.

С ростом категории шахты по метану газовый режим ужесточается. Вводятся дополнительные организационные и технические мероприятия, направленные на снижение рисков инцидентов и аварийных ситуаций.

### **Контрольные вопросы к главе 1**

1. Что такое шахтная атмосфера?
2. Основные компоненты шахтной атмосферы, их свойства.
3. Метан, его происхождение и свойства.
4. Что такое метанообильность горных выработок?
5. Что такое метаноемкость углей?
6. Газовый баланс угольных шахт.

## **2. ПРОЦЕССЫ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В ШАХТАХ**

### ***2.1. Газовыделение с обнаженной поверхности угольного пласта***

Газовыделение с обнаженной поверхности угольного пласта формируется за счет разности давлений на поверхности обнажения и в массиве. Интенсивность газовыделения тем больше, чем больше разность этих давлений, а также больше газопроницаемость пласта в направлении фильтрации метана. В этом плане, важное значение имеет взаимная ориентация плоскости обнажения и системы наиболее проводящих трещин. В угольном пласте, представляющим собой трещиновато-пористую среду, наиболее проводящими являются трещины напластования, коэффициент газопроницаемости которых на один-два порядка выше, чем у трещин, расположенных перпендикулярно. Если в пласте вскрыты именно эти трещины, то газовыделение из массива будет наиболее интенсивным с шипением выходящего газа и может продолжаться несколько суток (рис. 2.1).

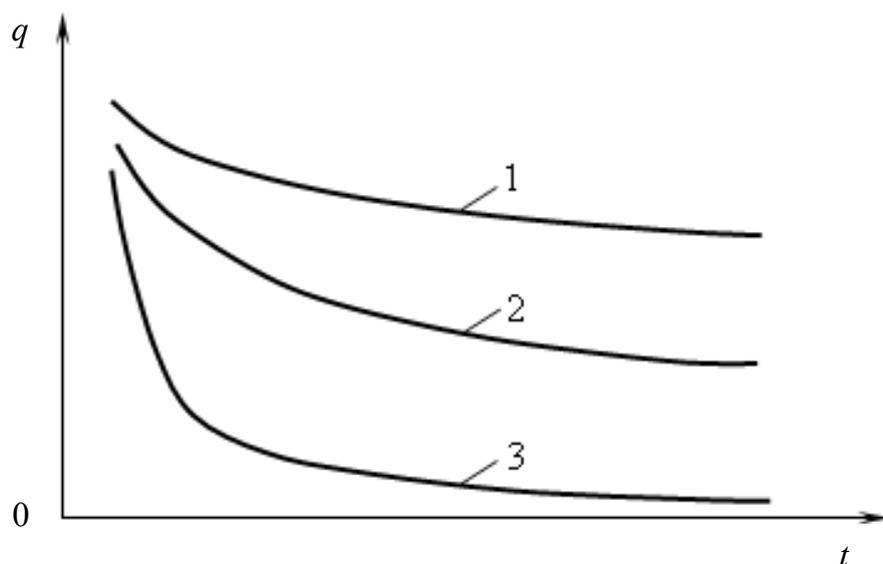


Рис. 2.1. Газовыделение с обнаженной поверхности пласта с высокой (1), средней (2) и низкой (3) газопроницаемостью

Продолжительность периода после обнажения массива, по истечении которого выделение газа с обнаженной поверхности прекращается, называется периодом дренирования. Учитывая, что газопроницаемость угольных пластов в среднем низкая, зона дренирования угольного пласта в течение неограниченного промежутка времени может составить 30–40 м.

В очистных забоях при комбайновой выемке угольного пласта с интервалом повторного обнажения одного и того же участка пласта в лаве 30–40 минут размер зоны дренирования не успевает достичь даже ширины захвата комбайна (0,9 м) и практически движется в направлении на массив с постоянной газоносностью, которая сформировалась к началу работы лавы. Несколько большие значения этой зоны могут быть после ремонтных смен или выходных дней. Следует заметить, что газовыделение в скважины тоже относится к этой категории, так как они создают поверхности обнажения в толще пласта.

## 2.2. Газовыделение из отбитого угля

Процесс газовыделения из отбитого угля с физической точки зрения аналогичен процессу газовыделения с обнаженной поверхности угольного массива и имеет лишь количественные отличия. Ввиду небольших размеров кусков угля, отторгаемого от массива исполнительным органом комбайна, его газоотдача про-

исходит значительно быстрее и в целом зависит от гранулометрического состава угольной массы и газоносности в момент отбойки. В настоящее время ввиду большой производительности очистных механизированных комплектов данный источник газовыделения является основным в общем газовом балансе шахты, вокруг которого должна строиться вся система управления аэрогазовой ситуацией при ведении угледобычи подземным способом.

Для более наглядного представления рассмотрим процесс газовыделения из отбитого угля при работе комбайна по челноковой схеме в лаве № 24-57 шахты им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» как наиболее характерный для современных высокотехнологичных шахт. В зависимости от фазы технологического цикла работы комбайна масса отбитого угля на лавном конвейере колеблется от 0 до 40 тонн как при прямом, так и при обратном проходе комбайна вдоль лавы.

Тенденции современной угледобычи сформировались таким образом, что практически все шахты Кузбасса работают с одним очистным забоем, что требует обеспечения его ритмичной работы с максимальным использованием технических возможностей оборудования и минимизации простоев по газовому фактору. В связи с этим возникает необходимость более детального исследования условий формирования источников газовыделения в пространство очистного забоя при работе комбайна на разных режимах. Как показывает практика, основным источником выделения метана в очистной забой является отбитый уголь, доленое участие которого в газовом балансе участка прямо пропорционально скорости продвижения линии очистного забоя. При современных длинах лав от 250 до 400 м масса угля на забойном конвейере при его полной загрузке может достигать от 30 до 40 тонн, что создает условия для интенсивного выделения метана из свежееотбитой угольной массы в очистной забой и, следовательно, требует подачи дополнительного количества воздуха для поддержания его концентрации менее 1 %.

Подобная ситуация чередуется с периодами, когда отбитый уголь на лавном конвейере отсутствует, что наблюдается либо в начале выемочного цикла, либо когда комбайн не ведет отбойку угля (ремонтная смена). Периодически повторяющаяся неравномерность выделения метана в очистной забой создает определенные трудности в управлении газовыделением на выемочном участке, а

зачастую приводит к автоматическому отключению электроэнергии и связанным с этим простоям. С другой стороны, вентиляционный режим участка и шахты в целом не может обеспечить гибкое регулирование подачи воздуха в лаву синхронно с колебаниями ее газообильности, максимальные значения которой повторяются с каждым циклом до 5–6 раз в смену.

Ориентировочно объем газа, выделившегося из отбитого угля за один проход комбайна, может быть рассчитан из выражения

$$Q = (X_0 - X_{\text{ост}}) L m d \gamma, \text{ м}^3, \quad (2.1)$$

где  $X_0$  – газоносность угля в краевой части пласта,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $X_{\text{ост}}$  – остаточная газоносность отбитого угля на выходе из очистного забоя,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $L$  – длина лавы, м;  $m$  – вынимаемая мощность пласта, м;  $d$  – ширина захвата комбайна, м;  $\gamma$  – плотность угля в массиве,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Общая масса угля, отторгаемого от массива исполнительным органом комбайна, распределяется во времени, затраченном на один проход вдоль лавы. В связи с этим для оценки объема газа, выделяющегося в очистной забой, необходимо учитывать, только тот уголь, который находится на лавном конвейере. Этот объем может быть вычислен по формуле

$$Q_1 = (X_0 - X_{\text{ост}}) \cdot l_{\text{к}} \cdot M, \quad (2.2)$$

где  $l_{\text{к}}$  – длина загруженной части конвейера, м;  $M$  – масса угля на 1 м длины конвейера, т.

Как видно из формулы (2.2), количество газа, выделившегося из отбитого угля при прямом ходе комбайна, линейно зависит от его удаления от начала движения и достигает максимума при подходе к противоположному концу лавы (рис. 2.2). Пропорционально этому изменяется дебит метана в лаву и его концентрация.

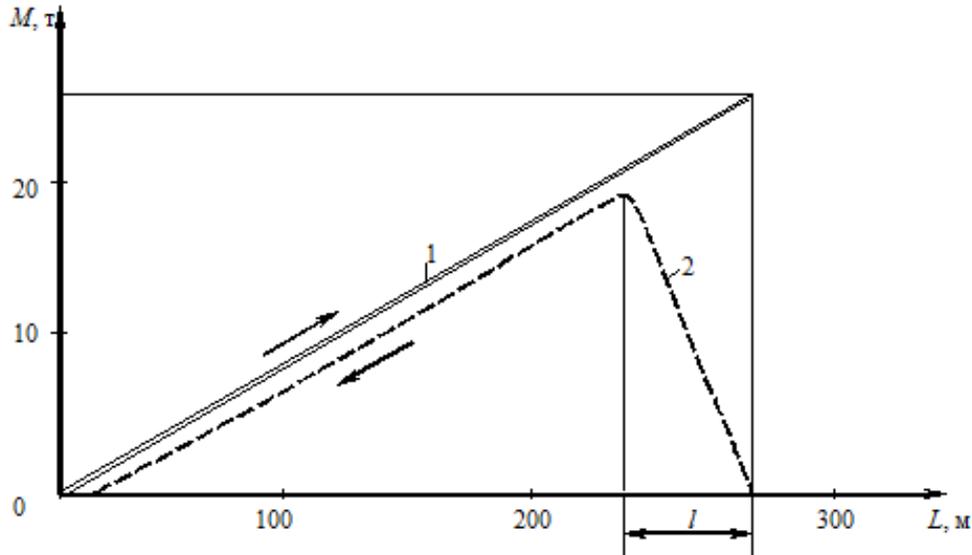


Рис. 2.2. Накопление массы отбитого угля на лавном конвейере при прямом (1) и обратном (2) ходе комбайна в пределах технологического цикла

При обратном ходе комбайна газообильность очистного забоя формируется более сложным образом, так как и комбайн и уголь на конвейере движутся в одном направлении, при этом длина грузовой ветви конвейера постоянно сокращается. В этом случае максимальное выделение газа из отбитого угля будет соответствовать положению комбайна на расстоянии от верхней точки лавы, определяемом по формуле

$$l = L \frac{V_{\text{КОМ}}}{V_{\text{КОН}}}, \quad (2.3)$$

где  $L$  – длина лавы, м;  $V_{\text{КОМ}}$  – скорость движения комбайна, м/с;  $V_{\text{КОН}}$  – скорость движения цепи конвейера, м/с.

После прохождения зоны максимума газовыделение из отбитого угля сокращается до минимума по достижении комбайном нижней точки лавы.

Приведенные результаты были получены по наблюдениям в лаве 24-57 шахты им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» при отработке пласта «Болдыревского». Лава оборудована комбайном Джой SL 300, крепью RS 2400-650, забойным конвейером AFG – 38/800/1500 и ленточным конвейером 4ЛЛ-1200-2. Лава имела нисходящее проветривание с количеством воздуха на входящей струе

1345 м<sup>3</sup>/мин по возвраточной схеме. На исходящей струе лавы количество воздуха составляло 954 м<sup>3</sup>/мин. Наблюдения проводились в добычную смену работы комбайна, который перемещался вдоль лавы по челноковой схеме, затрачивая на каждый цикл в среднем до 50 минут. По мере наращивания угольной массы на лавном конвейере возрастало и газовыделение из нее, которое рассчитывалось по формуле (2.1) и одновременно замерялось на исходящей струе лавы с интервалом пять минут. Замеры проводились без остановок комбайна за время цикла либо кратковременными остановками, если концентрация метана на исходящей струе превышала 1 %. В начале выемочного цикла концентрация метана составляла 0,2 %, что соответствовало абсолютной газообильности 1,9 м<sup>3</sup>/мин; в конце прямого хода комбайна эти значения составляли соответственно 0,8 % и 7,63 м<sup>3</sup>/мин. В ремонтную смену концентрация метана в лаве была постоянной и держалась на уровне 0,2–0,3 %.

Сравнивая кривые на рис. 2.2, видим, что наиболее неблагоприятная газовая ситуация в очистном забое складывается при прямом ходе комбайна, когда он доходит до верхней точки лавы, а конвейер имеет максимальную загрузку углем. Данное соотношение кривых абсолютной газообильности очистного забоя повторяется при каждом цикле и усиливается с увеличением длины лавы, которая может достигать 400 м (шахта им. В. Д. Ялевского, АО «СУЭК-Кузбасс»).

Полученные данные заставляют рассматривать отбитый уголь как основной источник газовыделения в очистной забой и разрабатывать мероприятия по снижению его интенсивности.

В сложившихся условиях, принимая во внимание тенденции усложнения аэрогазовой проблемы шахт с высокопроизводительными очистными забоями, возникает необходимость и целесообразность организации более гибкого управления газовыделением в течение всего технологического цикла разрушения и перемещения угольной массы. Особое внимание следует уделять моментам, приуроченным к максимальному газовыделению в атмосферу очистного забоя, и принимать корректирующие воздействия до наступления критического значения концентрации метана. В условиях, когда угольный пласт не дегазирован или дегазирован недостаточно, в качестве дополнительного способа сдерживания роста газообильности забоя целесообразно использовать комплекс организационно-технических

мероприятий, включающих кратковременные технологические паузы работы комбайна или уменьшение его скорости движения, что автоматически приводит к быстрому снижению массы отбитого угля и полному освобождению конвейера в течение 2–3 минут, а следовательно, и к снижению газообильности очистного забоя. Технологические паузы работы комбайна необходимо использовать при приближении концентрации метана на исходящей струе лавы к критическим значениям в 1 %.

Структура технологических пауз может иметь два характерных периода. Первый период – это остановка комбайна и спуск отбитого угля с конвейера на перегружатель (отрезки времени  $t_1$  на рис. 2.3, составляющие ориентировочно 1–2 минуты в зависимости от того, сколько метров прошел комбайн по лаве и скорости движения конвейера). Второй период (отрезки времени  $t_2$ ) характеризуется отсутствием угля на конвейере при остановке комбайна, продолжительность которого зависит от газовой ситуации в лаве, но с учетом количества подаваемого воздуха и его скорости он может длиться не более пяти минут.

По окончании паузы и включении комбайна начинается заполнение углем порожней ветви конвейера, что сопровождается увеличением массы отбитого угля и, соответственно, возобновлением газовыделения из него в очистной забой (отрезок  $t_3$ ). Однако следует отметить, что темпы роста угольной массы на лавном конвейере и концентрации выделяющегося из нее метана являются различными, причем последнее происходит намного медленнее первого и может составить 7–8 минут против 2–3 минут.

Данное обстоятельство можно рассматривать как определенный резерв в обеспечении нормализации аэрогазовой ситуации в очистном забое. Подобное соотношение будет соблюдаться при каждой технологической паузе, которых за один технологический цикл работы комбайна может потребоваться, как показывает практика, не более двух.

Общий баланс времени, затраченного на технологические паузы, составит

$$T = \sum_{i=1}^n t_1 + \sum_{i=1}^n t_2, \quad (2.4)$$

где  $\sum_{i=1}^n t_1$  – сумма отрезков времени, затраченного на освобождение конвейерного става от угля;  $\sum_{i=1}^n t_2$  – то же, при полном прекращении работы механизмов.

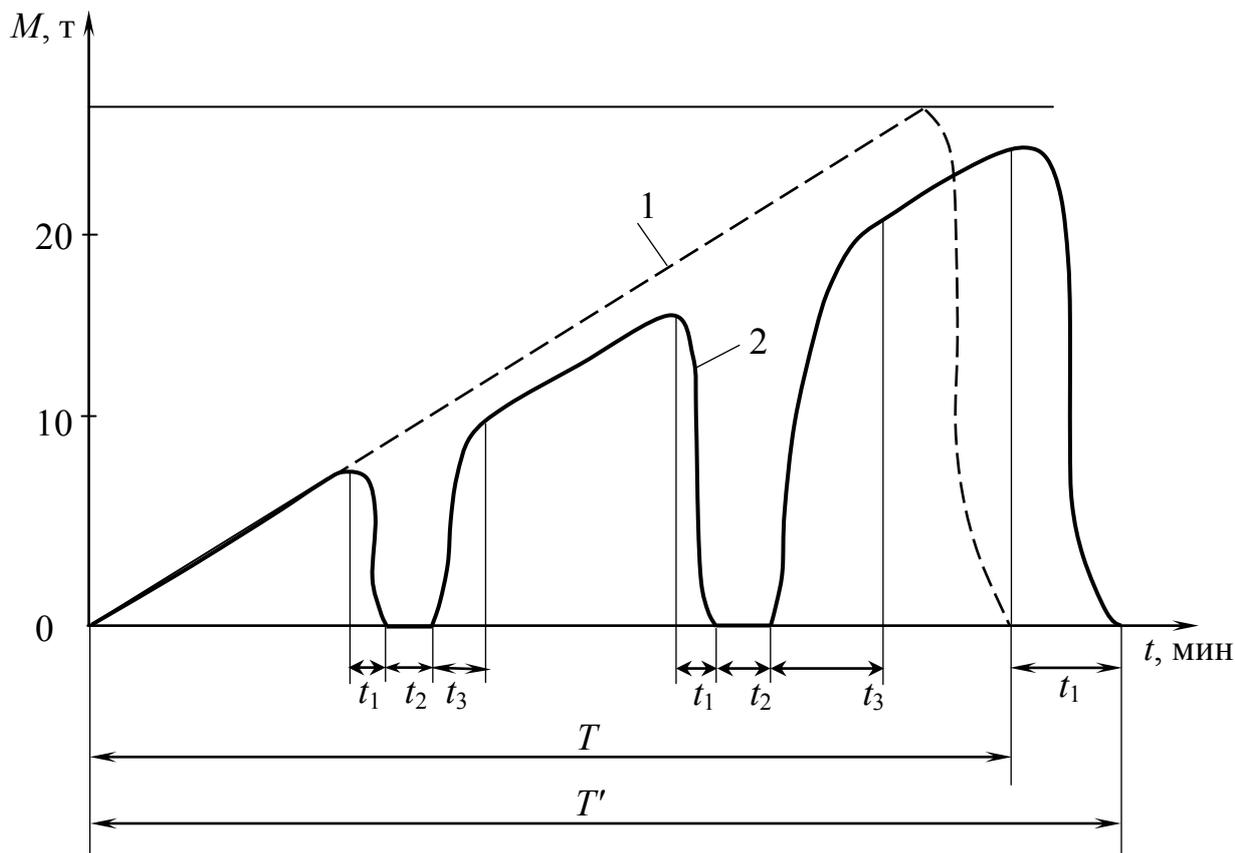


Рис. 2.3. Изменение массы отбитого угля, поступающего на лавный конвейер во время первой фазы технологического цикла при непрерывной работе комбайна (1) и при технологических паузах (2)  $t_1$  – время схода отбитого угля с конвейера после остановки комбайна;  $t_2$  – время паузы в работе комбайна;  $t_3$  – время повторного заполнения конвейера углем.  $T'$  и  $T$  – полное время цикла с технологическими паузами и без них

В реальных условиях время прямого хода комбайна с учетом технологических пауз при типовой длине лавы 250 м может составить до 30 минут, включая время пауз. Если же отключение электропитания участка происходит автоматическими средствами контроля шахтной атмосферы, то в этом случае вынужденные простои могут достигать получаса и более. При обратном ходе комбайна необходимость в остановках, как правило, не возникает в связи

с тем, что грузовая ветвь лавного конвейера не имеет полной загрузки и постоянно сокращается по мере перемещения комбайна в направлении конвейерного штрека.

Рассматривая отбитый уголь как основной источник газа в очистной забой, необходимо отметить также и то, что на скорость метановыделения из угля будет влиять и его гранулометрический состав. В частности, за время нахождения на конвейерной линии участка фракция угля 50 мм отдает до 50 % метана. Более мелкие фракции могут дегазироваться до 70–80 %. Данный фактор также должен учитываться при разработке мероприятий по управлению газовыделением из отбитого угля в забоях с использованием высокомеханизированных выемочных комплексов нового поколения.

В контексте решения проблемы исследования газовыделения из отбитого угля необходимо также рассматривать динамику газоотдачи из отбитого угля за пределами очистного забоя, когда уголь поступил на ленточный конвейер на конвейерном штреке. Учитывая большую протяженность транспортных выработок, примыкающих к очистному забою, необходимо исходить из того, что они имеют свою специфику формирования дебита газа в атмосферу из транспортируемой угольной массы во времени и пространстве и тесно связаны с технологическими операциями в очистном забое.

Особенности технологии механизированной отработки угольных пластов создают неравномерный характер поступления горной массы в пространство очистного забоя с резкими перепадами от максимума до нуля в пределах 20–25 минут. Соответственно формируется дебит метана, напрямую зависящий от объема отбитого угля с той же неравномерностью в пределах технологического цикла. Скачкообразный характер содержания метана в атмосфере очистного забоя затрудняет процесс контроля аэрогазовой ситуацией как в автоматическом, так и в ручном режиме. Часто повторяющиеся срабатывания приборов автоматического газового контроля по отключению питания забойных механизмов провоцируют горнорабочих на сознательное снижение порога чувствительности аппаратуры, что может повлечь аварийную ситуацию. Между тем повторное включение требует достаточно много времени на согласование и может занимать до 20–30 минут.

Совершенно очевидно, что важнейшим фактором, влияющим на улучшение аэрогазовой обстановки в очистном забое, является га-

зоносность пласта в призабойной зоне, снижение которой достигается путем качественно проведенной дегазации угольного пласта. Поскольку на практике заданные в нормативных документах значения остаточной газоносности пластов достигаются не всегда, возникает вынужденная необходимость искусственного ограничения производительности комбайна по так называемому «газовому фактору», что экономически нецелесообразно.

В практике работы очистных бригад угольных шахт при приближении концентрации метана на исходящей струе лавы к 1 %, производится остановка комбайна на несколько минут, пока уголь спускается с конвейера на перегружатель и восстанавливается нормальный режим проветривания. Данный прием в некоторой степени решает проблему и не требует много времени, так как с учетом скорости движения лавного конвейера его освобождение от угля происходит максимум за три минуты, тем более что за один проход комбайна требуется, как правило, около двух таких остановок в зависимости от длины лавы.

При оценке аэрогазовой ситуации в целом на выемочном участке целесообразно рассматривать два его основных объекта – очистной забой и конвейерных штрек. Каждый из них имеет свою специфику формирования газопритока в атмосферу из отбитого угля во времени и пространстве и требует отдельных подходов к управлению вентиляционным режимом, при этом аэрогазовые ситуации на данных объектах тесно взаимосвязаны. Все колебания массы отбитого угля на лавном конвейере, а следовательно, и дебит метана, впоследствии с некоторым запаздыванием повторяются на конвейерном штреке и на последующих участках транспортной сети.

На рис. 2.4 представлена динамика загрузки ленточного конвейера, установленного на конвейерном штреке за один технологический выемочный цикл работы комбайна в лаве 24-57 на пласте Болдыревский, шахта им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». С учетом разницы в скоростях движения лавного конвейера и ленточного на конвейерном штреке, которые составляют соответственно 1,3 и 3,15 м/с, можно выделить три основных периода изменения нагрузки на ленточный конвейер.

Первый период включает заполнение ленты углем с началом работы комбайна на всю длину, что составит 10,6 мин (участок ОА);

далее конвейер работает с полной нагрузкой, перемещая на ленте ориентировочно 220–240 тонн угля в течение времени, которое зависит от длины лавы и скорости движения комбайна, что при отсутствии остановок может составить 15–20 минут (участок АВ). Точка В соответствует моменту полного освобождения лавного конвейера от угля, когда его поступление на ленту прекращается и начинается скачивание остаточной угольной массы на конвейерный уклон (участок ВС). При обратном ходе комбайна в лаве характер загрузки ленточного конвейера полностью повторяется. При остановках комбайна в очистном забое во время технологических пауз будет происходить сдвигание точки В в положение В' и т. д. в зависимости от продолжительности каждой паузы. Можно с достаточной степенью уверенности предполагать, что подобные зависимости будут повторяться и на других выемочных участках с аналогичными параметрами отработки угольного пласта.

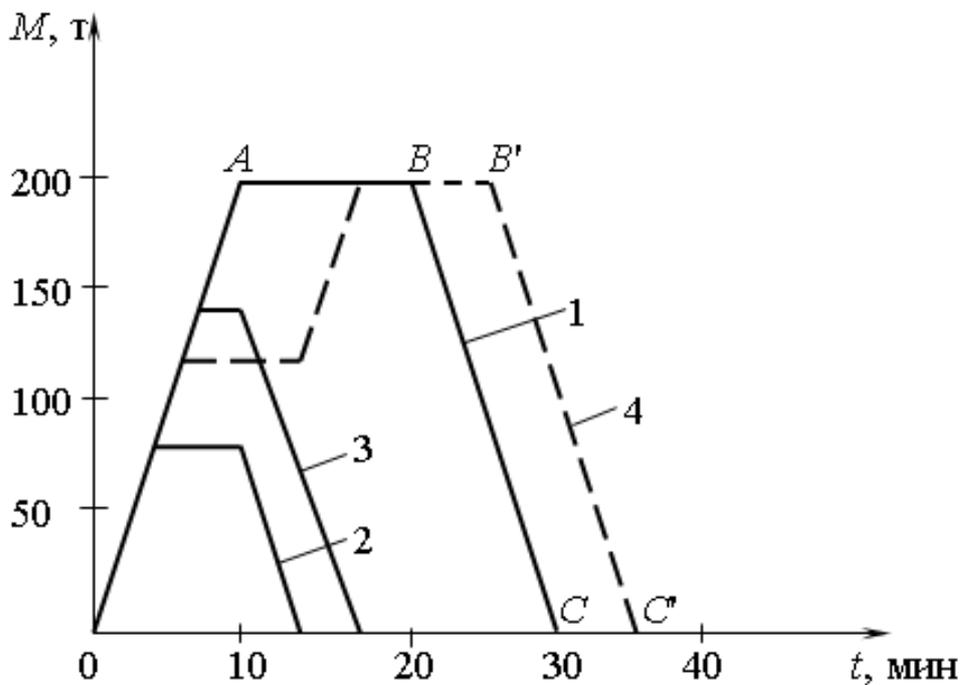


Рис. 2.4. Схема нагружения отбитого угля на ленточный конвейер транспортной выработки; 1 – при полной загрузке; 2, 3 – при неполной загрузке; 4 – при технологической паузе работы комбайна в лаве

На практике остановки в работе транспортной линии выемочного участка могут происходить не только в рамках регулирования аэрогазовой ситуации, но и по другим причинам. Все это будет вносить свои коррективы в график нагрузки ленточного конвейера в конвейерном штреке, однако в любом случае уменьшение массы

угля на ленте способствует снижению газовыделения в атмосферу выработок.

Описанная выше динамика загрузки отбитой горной массы конвейеров в очистном забое и в конвейерном штреке создает условия для нестационарных газодинамических процессов в этих выработках, периодически повторяющихся с каждым новым технологическим циклом. Это, в свою очередь, затрудняет организацию устойчивого режима проветривания и повышает вероятность возникновения инцидентов аэрологического характера, так как количество подаваемого на участок воздуха определяется расчетом и не может синхронно следовать колебаниям газообильности выработок. В этом плане вентиляция выемочного участка представляет собой трудно управляемую аэродинамическую систему взаимно влияющих друг на друга параметров, из которых важнейшими являются абсолютное газовыделение и количество подаваемого воздуха. Каждый из этих параметров имеет случайный характер изменения во времени, что порождает также случайный характер изменения концентрации метана, являющийся результатом их взаимодействия.

Современные системы автоматического газового контроля в угольных шахтах позволяют отслеживать уровень концентрации метана в режиме онлайн и оперативно реагировать на критические ситуации. В рассмотренных выше случаях такими ситуациями на выемочном участке можно считать периоды максимальной нагрузки на конвейеры как в очистном забое, так и на конвейерном штреке, когда существует высокая вероятность превышения концентрации метана выше 1 % и загазирования выработок. В практическом плане контроль за предельным содержанием метана мог бы считаться достаточным при условии его поддержания по всему объему очистного забоя, однако пространственное распределение концентрации метана, особенно при работающем комбайне по отбойке угля, является неравномерным и может превышать допустимые 2 % в местных скоплениях, наблюдаемых в зоне работы комбайнов и буровых станков. К наиболее вероятным местам формирования повышенных концентраций метана относятся также подкровельные пространства в лавах и тупиковых горных выработках, где могут возникать слоевые скопления, не проветриваемые вентиляционной струей.

Следует также учитывать длину выработок, по которым транспортируется отбитый уголь и взаимное направление движения грузовой ветви ленточного конвейера и воздушного потока. Поскольку при существующих схемах вентиляции выемочных участков шахт эти потоки, как правило, являются встречными, то рост концентрации метана в конвейерном штреке происходит в направлении от уклона до сопряжения с очистным забоем пропорционально массе угля на конвейере. Это обстоятельство требует применения отдельного проветривания лавы и конвейерного штрека, что обеспечивается либо нисходящим проветриванием очистного забоя, либо подачей свежей струи в лаву по штреку, параллельному конвейерному.

Аналогичный метод управления аэрогазовой ситуацией может быть применен и в тупиковых выработках при их механизированной проходке, однако в этом случае газовыделение из отбитого угля значительно ниже, чем в очистных забоях, так как проходческие комбайны имеют короткий цикл работы, определяемый шагом крепления выработок, с одной стороны, и большими перерывами между циклами – с другой.

### ***2.3. Газовыделение при взрывных работах***

При взрывных работах образуются газы в результате взрывного разложения взрывчатых веществ (ВВ). Параллельно с продуктами взрыва могут выделяться газы, содержащиеся во вмещающих породах и угольных пластах, а также в рудных телах. Поскольку взрыв – процесс мгновенный, то образовавшиеся газы заполняют выработку на некоторое расстояние в течение нескольких миллисекунд, называемое зоной отброса газов, определяемой по формуле А. И. Ксенофонтовой:

$$L = 15 + \frac{B}{5}, \quad (2.5)$$

где  $B$  – масса одновременно взрываемого ВВ, кг.

Из формулы (2.5) видно, что длина зоны отброса газов зависит от массы заряда.

Объем газов, выделившихся при взрыве, зависит от расхода ВВ и его газовойности и определяется по формуле

$$V = B \cdot I_{\text{ВВ}}, \quad (2.6)$$

где  $B$  – масса взрываемого ВВ, кг;  $I_{\text{ВВ}}$  – газовость ВВ (объем газов, выделяющихся при взрыве 1 кг ВВ).

При взрывании угля  $I_{\text{ВВ}} = 100$  л, при взрывании породы  $I_{\text{ВВ}} = 60$  л.

Учитывая, что после взрыва образуются поверхности свежих обнажений массива, а также определенное количество отбитого взрывом угля также с большой суммарной поверхностью газоотдачи, происходит резкий рост газовыделения в выработку, для снижения которого требуется определенное время для проветривания продолжительностью 15–20 минут. До нормализации аэрогазовой обстановки в выработке вход в нее запрещается.

К сказанному следует добавить, что в газовых угольных шахтах допускается привлечение только высокопредохранительных взрывчатых веществ, исключающих возможность взрыва метано-воздушной смеси за счет более короткого индукционного периода, когда газовая смесь не успевает нагреться до необходимой для взрыва температуры 650–750 °С.

Между тем необходимо также иметь ввиду, что в современных шахтах объем взрывных работ сведен к минимуму, а иногда и полностью отсутствует в силу изменившихся технологий угледобычи и проведения горных выработок. Полномасштабное ведение взрывных работ с применением массовых взрывов как основной технологической операции сохранилось только при открытой разработке месторождений полезных ископаемых и подземной разработке рудных месторождений.

#### ***2.4. Газовыделение из выработанных пространств***

Выработанные пространства образуются при системах разработки угольных пластов с обрушением кровли. В этом случае объем, освободившийся после выемки угля, заполняется обрушившимися породами кровли, которые с определенным шагом обрушения следуют за очистным забоем.

При системах разработки длинными столбами по простиранию с обрушением кровли особого внимания требует первая посадка лавы, так как она наступает не сразу, а после отхода очистного забоя от монтажной камеры на значительное расстояние, порой до-

стигающее нескольких десятков метров. Это расстояние зависит от прочности пород основной кровли и скорости подвигания линии очистного забоя и увеличивается с ростом последней. Тем временем в смежных с разрабатываемым выше- и нижележащих пластах происходит разгрузка от горного давления, что неизбежно приводит к десорбции химически связанного в этих пластах газа, и он начинает поступать в освободившийся объем выработанного пространства. Когда пролет подработанного массива достигает критической величины, происходит обрушение кровли и выброс больших объемов метана в очистной забой и прилегающие выработки с весьма сильным поршневым эффектом. В известной степени это можно считать опасным газодинамическим явлением, которого на шахте всегда ждут и прогнозируют момент его наступления по сдвигениям непосредственной кровли и нагрузке на секции крепи в очистном забое. После первой посадки лавы, если она прошла безаварийно, далее следует плавное обрушение кровли с определенным шагом в более спокойном режиме.

Вместе с тем выработанное пространство – это колоссальный коллектор свободного метана, находящийся в непосредственной близости от очистного забоя, что создает определенную опасность отжима газа в лаву и ее возможное загазирование. Концентрация метана в выработанном пространстве, как правило, неизвестна и не нормируется нормативными актами, хотя можно определенно говорить о концентрациях в десятки процентов и более. Это создает условия для вымывания газа из выработанного пространства в очистной забой и прилегающие к нему вентиляционный и конвейерный штреки, в зависимости от схемы вентиляции выемочного участка. На рис. 2.5 приведены схемы вентиляции выемочных участков с различными условиями выноса метана из выработанного пространства.

Как видно из приведенных схем, вынос максимальных объемов метана из завала на сопряжение лавы и вентиляционного штрека будет иметь место при вариантах *а* и *в*, минимальные утечки газа будут при вариантах *б* и *г*.

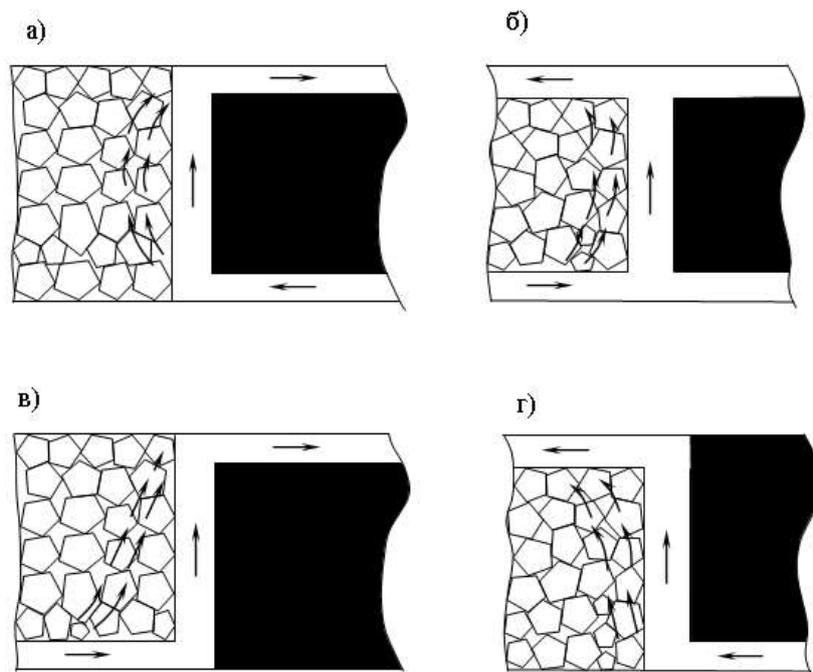


Рис. 2.5. Схемы вентиляции выемочных участков: а – возвратотечная на массив; б – возвратотечная на завал; в – z-образная на завал; г – z-образная на массив

Кроме вариантов схем вентиляции выемочных участков на величину утечек газа из выработанных пространств влияет ряд других факторов. Наиболее существенным из них является скорость подвигания очистного забоя. При малых скоростях до 5 метров в сутки газовыделение из выработанных пространств являлось основным элементом газового баланса участка, достигая 80 % и более. С внедрением механизированных комплексов нового поколения суточное подвигание лав выросло до 18–20 метров. При такой скорости движения очистного забоя в смежных пластах, питающих газом выработанное пространство разрабатываемого пласта, не успевают формироваться процессы сдвигания, достаточные для эффективной газоотдачи, и очистной забой как бы убегает от этих зон, в результате чего выработанное пространство, непосредственно примыкающее к забою, не обладает необходимым запасом метана для его перемещения в лаву. Соответственно снижается и доля данного источника в газовом балансе участка до 10–15 % и менее.

Следует отметить, что на газовыделение из выработанного пространства также оказывают влияние способ проветривания шахты и атмосферное давление. Теоретически при нагнетательном спо-

собе движение газа в сторону очистного забоя менее интенсивно, чем при всасывающем. Аналогичное воздействие оказывает и рост атмосферного давления.

Давая общую оценку газовыделению из выработанных пространств, необходимо учитывать и систему разработки угольных пластов, которая, в свою очередь, определяет взаимное расположение очистного забоя и выработанного пространства. В Кузбассе применяется более десяти систем разработки, при которых выработанное пространство может находиться не всегда на одном уровне с очистным забоем как при длинных столбах по простиранию, а выше или ниже его, что имеет место при разработке мощных пластов крутого падения. В частности, при щитовой системе разработки и родственной ей системе разработки с комбинированным гибким перекрытием выработанное пространство находится выше забоя, в результате чего метан не может поступать в очистной забой в силу своих физических свойств (рис. 2.6).

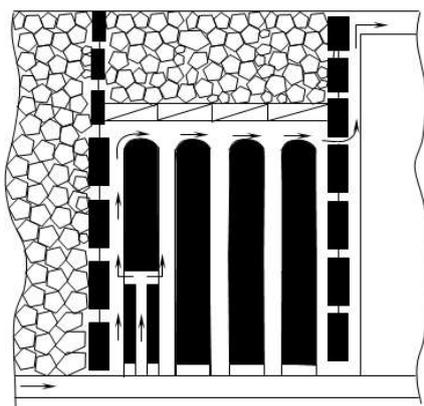


Рис. 2.6. Схема вентиляции выемочного участка, отрабатываемого щитовой системой разработки

При системах разработки мощных крутых пластов наклонными или поперечно-наклонными слоями с гидрозакладкой выработанного пространства последнее находится как выше, так и ниже очистного забоя, однако за счет закладки уменьшается сдвигание как временно невынимаемой толщи самого разрабатываемого пласта, так и смежных пластов, которые в Прокопьевско-Киселевском районе Кузбасса являются весьма сближенными, в результате чего уменьшается их газоотдача (рис. 2.7, 2.8, 2.9).

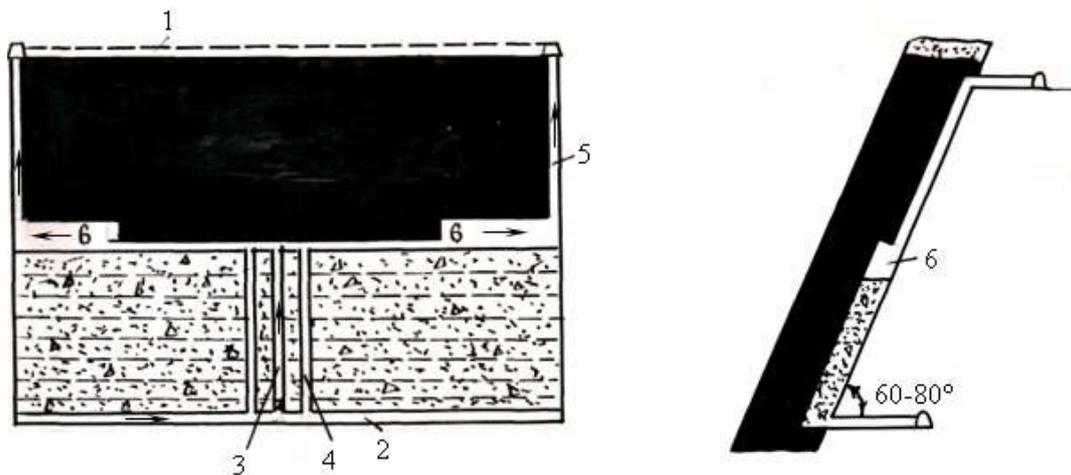


Рис. 2.7. Схема вентиляции выемочного участка при отработке нижнего слоя мощного пласта системой наклонных слоев с гидрозакладкой: 1 – вентиляционный штрек; 2 – откаточный штрек; 3 – углеспускная печь; 4 – дренажная печь; 5 – вентиляционный скат; 6 – очистные забои

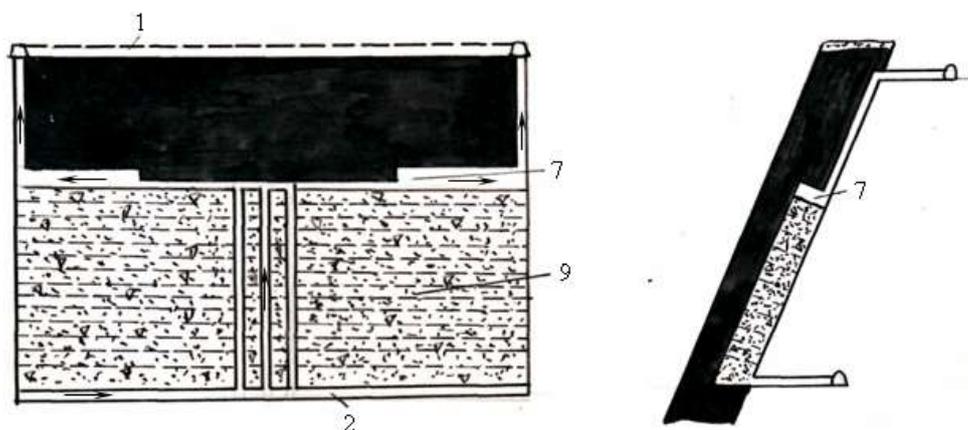


Рис. 2.8. Схема вентиляции выемочного участка при отработке нижнего слоя мощного пласта системой поперечно-наклонных слоев с гидрозакладкой: 7 – вентиляционный скат; 9 – закладочный массив

Следует отметить, что разработка мощных пластов крутого падения в Кузбассе практически сведена к минимуму, однако знание особенностей вышеупомянутых систем разработки необходимо для горного инженера.

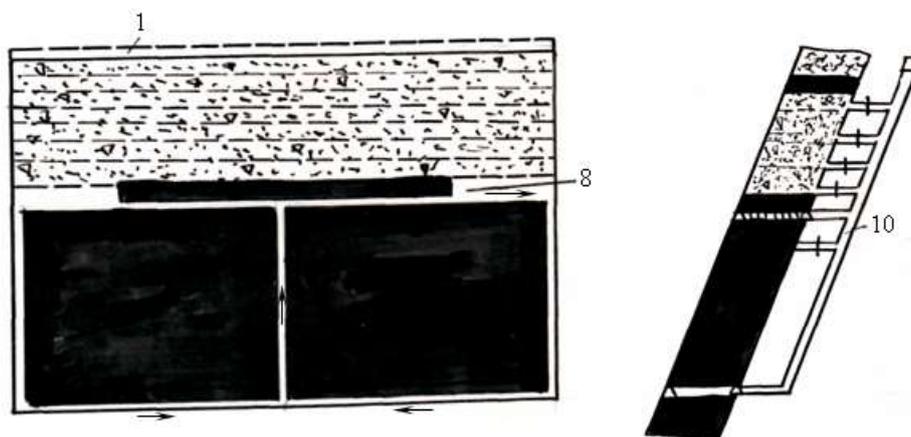


Рис. 2.9. Схема вентиляции выемочного участка при отработке мощного пласта системой горизонтальных слоев с гидрозакладкой: 8 – очистной забой; 10 – полевой вентиляционный скат

### ***2.5. Газовыделение при работе двигателей внутреннего сгорания***

В настоящее время в связи с широким внедрением в шахтах монорельсового транспорта появился новый источник газов – двигатели внутреннего сгорания, на которых работают дизелевозы и другие транспортные машины. Так как основным топливом для этих машин является дизельное топливо, то отработавшие газы выбрасывают в шахтную атмосферу ряд токсичных веществ, отрицательно действующих на здоровье горнорабочих, хотя и не содержат опасности для самой рудничной атмосферы. В частности, в составе отработавших газов дизельных двигателей содержатся соединения азота (оксид, диоксид, пятиоксид (76–78 %)), углекислый газ (1–10 %), сернистый газ, формальдегид, акролеин и др.

Объем выбросов указанных газов зависит от числа работающих машин, нагрузки на двигатель, режима работы, типа двигателей и их состояния. Наиболее токсичными компонентами в составе отработавших газов являются оксиды азота и акролеин. Первые могут вызвать при вдохе отек легкого, что является тяжелым случаем с возможным смертельным исходом, второй является сильнейшим канцерогеном, вызывающим онкологические заболевания органов дыхания и крови. Суммарный объем газов, выделяющихся одним двигателем, находится в пределах  $0,04\text{--}1,1\text{ м}^3/\text{с}$  на 1 кВт мощности двигателя.

## Контрольные вопросы к главе 2

1. Какие известны виды газовых потоков?
2. Виды выделений метана в шахтах.
3. Основные источники газовой выделений в современных шахтах.
4. Стационарные, нестационарные и переходные газодинамические процессы в шахтах.
5. Неравномерность газовой выделений в шахтах.
6. Слоевые скопления метана в горных выработках.
7. Газовыделение из отбитого угля.
8. От чего зависит газовой выделение с обнаженной поверхности угольного пласта?
9. Газовыделение при взрывных работах.
10. Газовыделение из выработанных пространств.
11. Газовыделение при работе двигателей внутреннего сгорания.

## 3. ШАХТНАЯ АЭРОМЕХАНИКА

### 3.1. Основные законы аэростатики

Аэростатика – наука о равновесии газов. Одной из основных задач аэростатики является определение изменения давления в неподвижном воздухе с ростом высоты или глубины. Давление в любой точке создается весом лежащих выше слоев воздуха. Основное уравнение аэростатики в проекциях на оси координат имеет вид

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (3.1)$$

где  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность воздуха;  $X, Y, Z$  – проекции объемной силы на оси  $x, y, z$ .

В неподвижном воздухе, как правило, на любой его элементарный объем будет действовать только сила тяжести, направленная по оси  $z$  (рис. 3.1), а силы, направленные по осям  $x$  и  $y$  будут отсутствовать. Тогда уравнение (3.1) примет вид

$$dp = \rho Zdz. \quad (3.2)$$

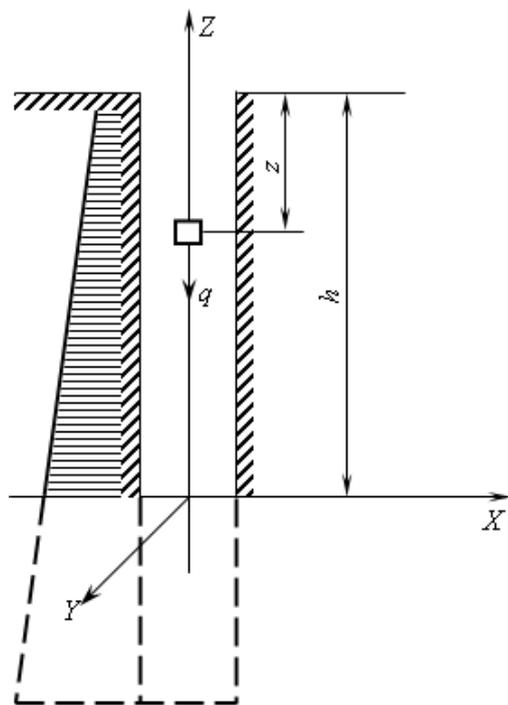


Рис. 3.1. Изменение давления в единичном объеме неподвижного воздуха с глубиной

Так как  $Z = g$ , то получим

$$dp = \rho g dz. \quad (3.3)$$

Проинтегрировав выражение (3.3) по  $z$  в пределах от 0 до  $h$ , где  $h$  – глубина ствола, получим

$$p = g \int_0^h \rho dz + p_0 \quad (3.4)$$

или

$$p = p_0 + g\rho h. \quad (3.5)$$

Согласно закону Паскаля аэростатическое давление действует одинаково во всех направлениях. Если рассматривать какое-либо тело, находящееся в неподвижном воздухе, то можем видеть, что равнодействующая всех сил давления, действующего на него, равна нулю, то есть аэростатическое давление не может вызвать перемещение тела в пространстве.

Давление в шахте зависит от атмосферного давления на поверхности. Аэростатическое давление увеличивается с ростом глубины, и на разных горизонтах шахты оно может быть разным, од-

нако любые колебания атмосферного давления на поверхности вызывают такие же изменения давления в шахте.

### ***3.2. Основные понятия аэродинамики***

Аэродинамика – это наука о движущемся воздухе. Если в воздушный поток поместить какое-либо тело, то движущийся воздух будет оказывать на него давление, определяемое его кинетической энергией. Такое давление называется динамическим. Поскольку в шахте всегда есть движение воздуха в горных выработках, то полное давление будет складываться из статической и динамической составляющих:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}} \cdot \quad (3.6)$$

В отличие от статического давления, действующего во всех направлениях на любое тело, динамическое давление действует только на поверхность, перпендикулярную направлению потока, и пропорционально квадрату его скорости:

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.7)$$

Разность давления между двумя точками называется депрессией. Депрессия – основное условие движения воздуха по горным выработкам. Она может относиться к отдельной выработке, отдельному забою или к шахте в целом (в этом случае ее называют общешахтная депрессия).

### ***3.3. Основные законы аэродинамики***

#### ***3.3.1. Закон сохранения массы***

Масса любого объема воздуха в процессе его движения остается постоянной во времени. Если из потока воздуха выделить элементарный объем с постоянной плотностью, то закон сохранения массы будет иметь вид

$$\frac{dM}{dt} = 0. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8), выраженное через проекции скорости потока на оси координат, примет вид

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (3.9)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции скорости потока на оси координат.

Выражение (3.9) называется уравнением неразрывности потока. При  $\rho = \text{const}$  уравнение (3.9) примет вид

$$\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 0. \quad (3.10)$$

Из данного уравнения следует, что увеличение скорости потока в одном направлении должно вызывать уменьшение скорости в другом, так как сумма членов будет равна нулю.

Если выразить массу воздуха в виде  $M = \rho Q$ , то закон сохранения массы для изотермического потока можно трактовать как закон сохранения количества воздуха, т. е.  $Q = \text{const}$ .

При разветвлении потока закон сохранения количества воздуха примет вид

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (3.11)$$

где  $i$  – номер потока;  $n$  – число разветвлений в узле (рис. 3.2).

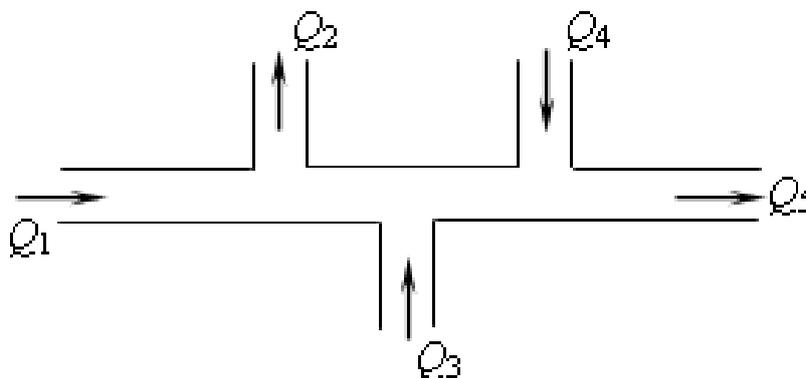


Рис. 3.2. Схема разветвления воздушных потоков

Для схемы, показанной на рис. 3.2, уравнение (3.11) выразится в виде

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 = 0. \quad (3.12)$$

В уравнении (3.12) входящие в узел потоки принимаются положительными, а исходящие – отрицательными.

### 3.3.2. Закон сохранения энергии

Изменение энергии потока может происходить за счет изменения его плотности, сил гравитации и скорости воздуха, что в совокупности характеризует общую энергию потока. В этом случае закон сохранения энергии формулируется следующим образом: изменение энергии произвольного объема движущегося воздуха за некоторый промежуток времени равно сумме сообщенной ему тепловой энергии и работы внешних сил, приложенных к воздуху, т. е.

$$\Delta E_{\text{в}} + \Delta E_{\text{п}} + \Delta E_{\text{к}} = \Delta Q + \Delta A, \quad (3.13)$$

где  $\Delta E_{\text{в}}$  – изменение внутренней энергии движущегося потока;  $\Delta E_{\text{п}}$  – изменение потенциальной энергии движущегося воздуха;  $\Delta E_{\text{к}}$  – изменение кинетической энергии движущегося воздуха;  $\Delta Q$  – изменение тепловой энергии потока;  $\Delta A$  – работа внешних сил.

В развернутом виде уравнение (3.13) для изотермического потока примет вид

$$(P_1 - P_2) + g\rho(Z_1 - Z_2) + \frac{\rho}{2}(V_1^2 - V_2^2) = h, \quad (3.14)$$

где  $P_1, P_2$  – давление воздуха в сечениях 1 и 2;  $Z_1, Z_2$  – высота сечений 1 и 2;  $V_1, V_2$  – средняя скорость движения воздуха в сечениях 1 и 2;  $h$  – работа внешних сил.

Выражение (3.14) называется уравнением Бернулли, одинаково справедливое как для жидкостей, так и для газов.

Графическая интерпретация уравнения Бернулли представлена на рис. 3.3.

Из уравнения Бернулли следует, что при установившемся адиабатическом движении воздуха по выработкам энергия, поступающая в поток от внешних источников, полностью расходуется на преодоление всех сопротивлений на пути движения воздуха.

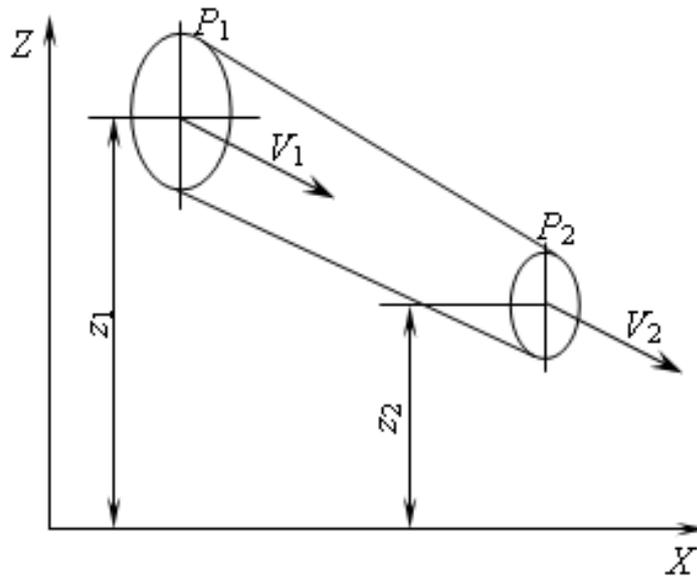


Рис. 3.3. Графическая интерпретация уравнения Бернулли

Уравнение Бернулли является одним из основных уравнений шахтной аэродинамики, так как содержит все основные величины, необходимые для решения аэродинамических задач. Разность давлений  $P_1 - P_2$  является следствием работы вентилятора и называется депрессией вентилятора  $h_b$ . Дополнительная разность давлений  $g(\rho Z_1 - \rho Z_2)$  создается силами гравитации отдельных частей воздушного потока и называется депрессией естественной тяги  $h_e$ . Динамический напор создается разностью скоростей в смежных сечениях  $h_{дин}$ . Тогда в сокращенной форме уравнение Бернулли можно записать

$$h_b \pm h_e \pm h_{дин} = h. \quad (3.15)$$

Естественная тяга может увеличивать энергию потока или играть роль сопротивления, что зависит от плотности воздуха, поступающего в шахту и направления входящей вентиляционной струи. На интенсивность естественной тяги влияет разность температура воздуха, подаваемого в шахту вентилятором, в связи с чем она имеет явно выраженные сезонные колебания.

### 3.3.3. Режимы движения воздуха в шахтах

Течение газозвушной смеси по любому каналу может быть ламинарным или турбулентным в зависимости от ее вязкости, ско-

рости потока и размеров поперечного сечения выработки. Ламинарный режим характеризуется малой скоростью и параллельными траекториями движения частиц при отсутствии перемешивания между отдельными слоями потока. При турбулентном режиме скорость и давление потока постоянно меняются во времени, происходит пульсация и перемешивание отдельных струй с переносом газа, пыли, тепла.

Аналитически режим движения воздуха в выработке можно определить по числу Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu}, \quad (3.16)$$

где  $V$  – средняя скорость движения воздуха в выработке, м/с;  $D$  – гидравлический диаметр выработки, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Гидравлический диаметр выработки определяется из выражения

$$D = \frac{4S}{P}, \quad (3.17)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $P$  – периметр выработки, м.

Экспериментально установлено, что в гладких трубах при числе Рейнольдса  $\text{Re} \geq 2300$  режим является турбулентным, при  $\text{Re} \leq 2300$  – ламинарным. Для горных выработок шахт это критическое значение составляет соответственно 1500–1000. В горных выработках режим движения всегда принимается турбулентным независимо от скорости потока воздуха, так как минимальная скорость, при которой движение сохраняет признаки турбулентности составляет около 0,001 м/с. В связи с этим Правилами безопасности в угольных шахтах установлена минимально необходимая скорость воздуха в выработках – не менее 0,25 м/с.

Вместе с тем, как показывают наблюдения, в сечении выработок возможно существование промежуточного режима. Промежуточные режимы наблюдаются, когда при развитом турбулентном течении у стенок выработок сохраняется тонкий ламинарный слой, который носит название ламинарного пограничного слоя. При малом числе Рейнольдса толщина пограничного слоя больше и в него погружены все шероховатости, в результате чего они оказывают

минимальное сопротивление потоку. С ростом числа Рейнольдса толщина ламинарного слоя уменьшается, все выступы и шероховатости внедряются в турбулентное ядро, в результате чего сопротивление потоку возрастает.

### 3.3.4. Характеристики турбулентных свободных струй

Свободной называется воздушная струя, не имеющая твердых границ. В шахтной вентиляции они действуют при проветривании камер, тупиковых выработок при их проходке, угольных забоев на открытых горных работах, а также при освоении подземного пространства крупных городов. В свободных струях также присутствуют молекулярные и турбулентные составляющие и пульсационные скорости.

При выходе воздушного потока из сечения АВ на его кромке происходит срыв струи, в результате чего образуется расширяющийся турбулентный пограничный слой  $A'ACBVB'$  (рис. 3.4).

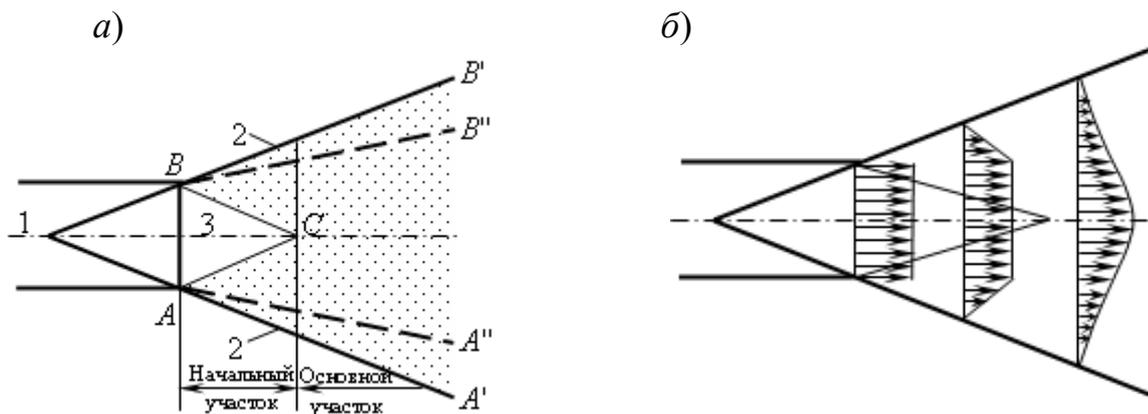


Рис. 3.4. Схема турбулентной свободной струи: 1 – полюс струи; 2 – внешняя граница; 3 – ядро постоянной скорости (а) и эпюра скоростей (б)

Центральное ядро струи, через поперечное сечение которого приходит количество воздуха такое же, как в начальном сечении, называется ядром постоянной массы ( $B''BAA''$ ). Между ядром постоянной массы и внешней границей струи формируется вовлечение присоединенных масс, движущихся в том же направлении. Объем присоединенных масс увеличивается в направлении движения. Присоединенные массы воздуха выполняют функцию посред-

ника между чистым воздухом ядра и загрязненным воздухом, в котором распространяется свободная струя. Дальность свободной струи определяется по формуле

$$L_c = 0,5b(1 + 0,5a), \quad (3.18)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий структуру струи  $a = 0,06–0,08$ ;  $b$  – максимальное расстояние от вентиляционной трубы до боковой поверхности выработки, в которую подается свободная струя.

### **3.3.5. Закон сопротивления**

Под законом сопротивления понимается соотношение между депрессией и скоростью движения воздуха или его расходом и выражается в виде

$$h = RQ^n, \quad (3.19)$$

где  $R$  – аэродинамическое сопротивление выработки,  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ ;  $Q$  – расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $n$  – показатель степени, зависящий от режима движения воздуха.

При малой скорости потока (ламинарный режим) показатель степени  $n$  принимается равным единице, при скоростях реально имеющих место в горных выработках  $n = 2$ . Депрессия выработок всегда рассчитывается при  $n = 2$ , что вносит в расчет некоторый запас.

### **Контрольные вопросы к главе 3**

1. Основное уравнение аэростатики.
2. В каких направлениях действует аэростатическое давление?
3. Основные понятия аэродинамики.
4. В каком направлении действует динамическое давление?
5. Закон сохранения массы.
6. Что характеризует узловое уравнение?
7. Закон сохранения энергии воздушного потока.
8. Режимы движения воздуха в шахтах.

## 4. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

### *4.1. Природа аэродинамического сопротивления движению воздуха в горных выработках*

Шахтная вентиляционная система включает в себя совокупность горных выработок разного назначения и размеров, вентиляционные сооружения и источники движения воздуха (вентиляторы). Движение воздуха по горным выработкам неизменно встречает в них сопротивление, которое называется аэродинамическим. Учитывая, что в воздухе действуют силы межмолекулярного сцепления, обуславливающие молекулярную вязкость. В этом случае происходит прилипание воздуха к поверхности воздуховода, что вызывает торможение тем больше, чем больше неровностей в стенках выработок. Такой вид сопротивления называется сопротивлением трения.

При движении воздух также может встречать на своем пути различные предметы, оборудование, элементы крепи. Это тоже создает препятствие потоку, и он теряет часть своей энергии на обтекание этих препятствий. Такой вид сопротивления называется лобовым. И, наконец, выработки, по которым движется воздух, не являются идеально прямолинейными, а имеют множество поворотов, изменений сечений, сопряжений и т. д., что тоже требует затрат энергии потока на их преодоление. Такое сопротивление называется местным. В реальных условиях угольных шахт могут одновременно присутствовать все три вида аэродинамических сопротивлений, что будет определять общее сопротивление вентиляционной сети шахты и характеризовать ее с точки зрения легкости или трудности проветривания. Такую оценку можно провести по построению аэродинамической характеристики сети (рис. 4.1).

Из рис. 4.1 видно, что для подачи одного и того же количества воздуха, полученного расчетом  $Q_i$ , надо для сети 2 обеспечить депрессию выше, чем для сети 1, что свидетельствует о ее большем аэродинамическом сопротивлении.

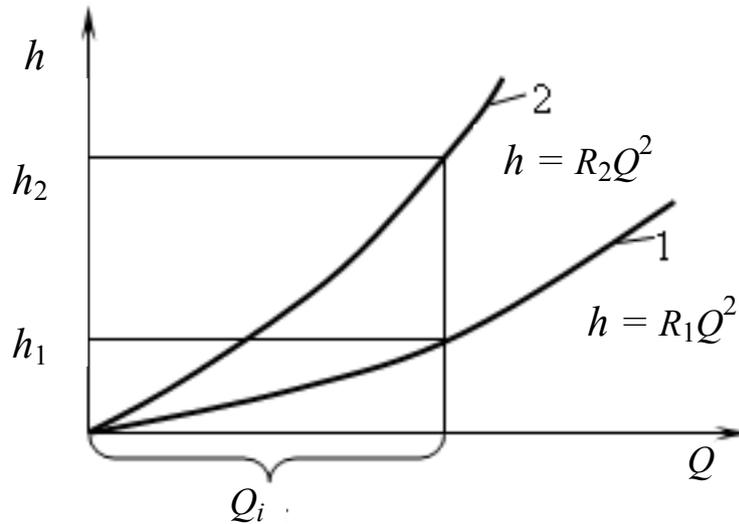


Рис. 4.1. Сравнительные аэродинамические характеристики вентиляционных сетей: 1 – легкопроветриваемая сеть; 2 – труднопроветриваемая сеть

#### 4.2. Сопротивление трения

В связи с тем, что поверхность горных выработок шероховата, движущийся воздух в процессе трения об эту поверхность встречает препятствия от неровностей по всему периметру горной выработки на всем ее протяжении. Кроме того, в горных выработках сопротивление создают и элементы крепи, которые могут выступать за контур сечения выработки в свету и частично создавать лобовое сопротивление.

Необходимо отметить, что в настоящее время, когда из шахт исчезли такие виды крепления, как трапецевидная деревянная крепь с диаметром стоек до 0,2 м, металлическая арочная крепь из спецпрофиля типа СВП, тубинги, взамен им пришло анкерное крепление, аэродинамическое сопротивление трению которого значительно ниже. Тем не менее, оно остается основным видом сопротивления, по которому рассчитывается общешахтная депрессия.

Рассмотрим случай движения воздуха по горизонтальной прямолинейной выработке постоянного сечения. Используем уравнение Бернулли для двух сечений I и II, в которых  $v_1 = v_2$  и  $z_1 = z_2$ . При постоянной плотности воздуха получим

$$P_1 - P_2 = h. \quad (4.1)$$

Потерю энергии на преодоление сопротивления трения, отнесенную к единице объема на участке между сечениями I и II можно выразить

$$dh = Tdx, \quad (4.2)$$

где  $x$  – расстояние между сечениями;  $T$  – сила трения на единицу объема.

$$T = \frac{\tau \cdot P \cdot 1}{S \cdot 1}, \quad (4.3)$$

где  $\tau$  – сила трения на единицу площади поверхности выработки;  $P, S$  – соответственно периметр и площадь поперечного сечения выработки единичной длины.

Тогда из выражений (4.2) и (4.3) найдем

$$P_1 - P_2 = \frac{P}{S} \int_I^{II} \tau dx. \quad (4.4)$$

Из гидравлики известно, что

$$\tau = \beta \frac{\rho V^2}{2}, \quad (4.5)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $V$  – средняя скорость движения воздуха в выработке;  $\beta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень шероховатости выработки

$$\beta = \frac{h}{P L} \cdot \frac{2S}{\rho V^2}. \quad (4.6)$$

В рассматриваемых условиях  $\rho$  и  $V$  постоянны. Примем шероховатость выработки также постоянной по ее длине. Проинтегрировав выражение (4.4) с учетом (4.5) получим формулу для определения депрессии трения

$$h = P_1 - P_2 = \frac{\rho \beta}{2} \cdot \frac{P L}{S} \cdot V^2. \quad (4.7)$$

Так как  $\rho$  и  $\beta$  приняты постоянными, то их совокупное воздействие можно обозначить одной величиной, которая называется коэффициентом сопротивления трению

$$\alpha = \frac{\beta \rho}{2}. \quad (4.8)$$

Так как  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ , то  $\alpha = 0,6\beta$ .

Подставив значение  $\alpha$  в формулу (4.7) и заменив  $V = \frac{Q}{S}$ , получим окончательное выражение формулы депрессии трения

$$h = \alpha \frac{L P}{S^3} Q^2. \quad (4.9)$$

Обозначив  $\alpha \frac{L P}{S^3} = R$ , получим  $h = R \cdot Q^2$ , где  $R$  – общее аэродинамическое сопротивление всей выработки,  $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^8$ .

Значение величины  $R$  можно также определить опытным путем в шахтных условиях. Значение коэффициента аэродинамического сопротивления  $\alpha$  дается в справочниках по рудничной вентиляции, но может быть определено и экспериментально.

### *4.3. Местное сопротивление*

К местным относятся сопротивления, вызываемые изменениями формы, размеров и направления внешних границ потока, включая повороты, расширения и сужения выработок, слияния и разветвления струй, вентиляционные каналы, кроссинги, различные регуляторы и др. Местные сопротивления изменяют конфигурацию и характер потока на некотором расстоянии перед и за собой и приводят к отрыву потока от стенок и образованию вихревых течений, к смешиванию и разделению потока.

Депрессия, затрачиваемая на преодоление местного сопротивления, определяется по формуле

$$h = \xi \frac{\rho V^2}{2}, \quad (4.10)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  $V$  – средняя скорость потока.

Виды местных сопротивлений представлены на рис. 4.2.

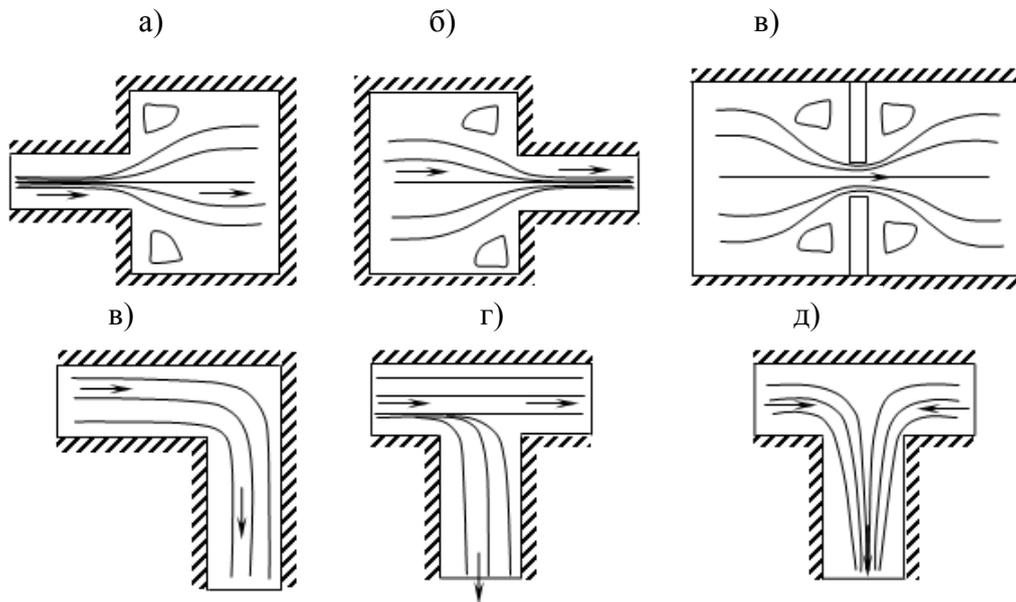


Рис. 4.2. Виды местных сопротивлений: а – расширение потока; б – сужение потока; в – перемычка с окном; г – поворот потока; д – разветвление потоков; е – слияние потоков

#### 4.4. Лобовое сопротивление

Лобовым называется сопротивление, оказываемой потоку находящимся в нем предметом, размеры которого значимы по сравнению с элементами, размещенными в выработке в качестве коммуникаций, трубопроводов, сигнализаторов метана и др. Таким образом, реальное лобовое сопротивление может создавать, например, конвейер, дизелевоз, вагонетка, даже группа людей, стоящих в выработке. Зачастую в выработках производится временное складирование материалов, частично перекрывающее сечение. Во всех случаях воздушный поток оказывает скоростное давление на препятствие с силой, определяемой из выражения

$$F = K_{\text{л}} \frac{\rho V^2}{2} \cdot S_{\text{м}}, \quad (4.11)$$

где  $K_{\text{л}}$  – коэффициент лобового сопротивления;  $V$  – средняя скорость движения воздуха около препятствия, м/с;  $S_{\text{м}}$  – миделево сечение тела (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению движения), м<sup>2</sup>.

Для определения депрессии лобового сопротивления выделим в выработке участок, в котором имеется лобовое сопротивление (рис. 4.3).

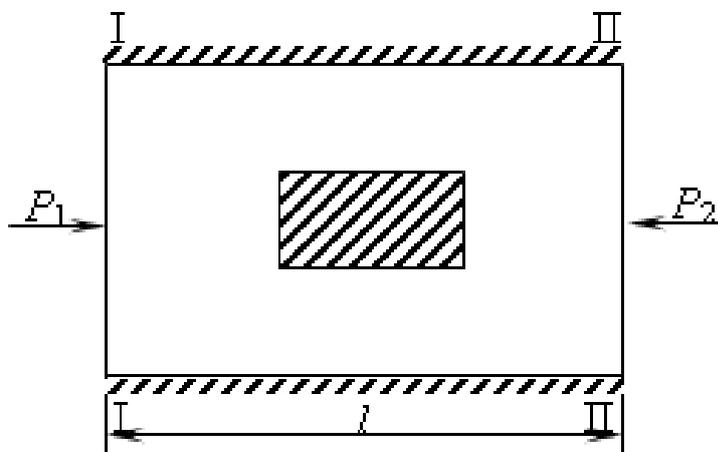


Рис. 4.3. Схема к определению депрессии лобового сопротивления

Отбросив части потока за пределами сечения I–I и II–II, заменим их действие силами  $P_1S$  и  $P_2S$ , тогда  $P_1S = P_2S + F$  или  $P_1 - P_2 = \frac{F}{S}$  с учетом (4.11) получим

$$h = K_{\text{л}} \frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{S_{\text{м}}}{S}. \quad (4.12)$$

#### 4.5. Эквивалентное отверстие шахты

Эквивалентное отверстие шахты, это в некоторой степени, искусственное понятие, представляющее собой круглое отверстие в плоской стенке, аэродинамическое сопротивление которого равно сопротивлению шахты в целом.

Рассмотрим схему движения воздуха через отверстие в стене диаметром  $A$  (рис. 4.4). При прохождении воздуха через отверстие перед входом в него поток сужается до величины  $A' = \psi A$ , где коэффициент  $\psi$  для круглого сечения равно 0,65 (известно из гидравлики).

Тогда уравнение Бернулли запишется в виде

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2}. \quad (4.13)$$

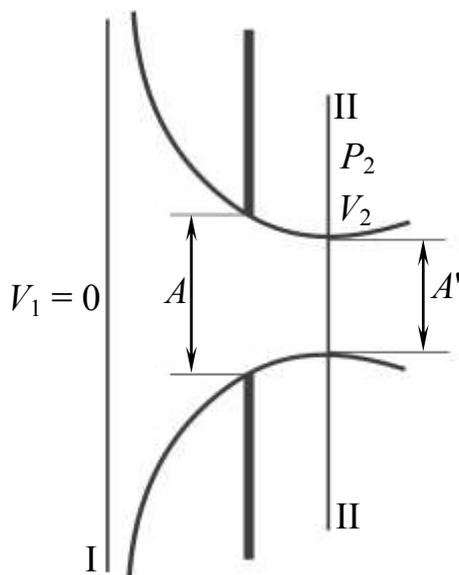


Рис. 4.4. Схема движения воздуха через круглое отверстие

Скорость движения воздуха в наиболее узкой части струи будет равна

$$V_2 = \frac{Q}{A'}, \quad (4.14)$$

где  $Q$  – расход воздуха через отверстие;  $A'$  – площадь поперечного сечения струи в наиболее узкой части.

Из гидравлики известно, что отношение площади поперечного сечения наиболее узкой части струи к площади отверстия практически постоянно:

$$\frac{A'}{A} = \Psi = \text{const}. \quad (4.15)$$

Для круглого сечения  $\Psi = 0,65$ . Подставив в выражение (4.14) значения  $V_2$  и  $A'$ , получим формулу для определения эквивалентного отверстия:

$$A = \frac{Q}{\Psi \sqrt{\frac{2h}{\rho}}}, \quad (4.16)$$

где  $h$  – депрессия отверстия, Па.

При  $\Psi = 0,65$ ,  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^2$  формула примет вид

$$A = \frac{1,19Q}{\sqrt{h}}. \quad (4.17)$$

Условно считается, что для легкопроветриваемых шахт  $A > 2$ , для шахт средней трудности проветривания  $1 \leq A \leq 2$ , а для труднопроветриваемых шахт  $A < 1$ .

### **Контрольные вопросы к главе 4**

1. Что такое аэродинамическое сопротивление?
2. Аэродинамическое сопротивление трения.
3. Местное аэродинамическое сопротивление.
4. Лобовое аэродинамическое сопротивление.
5. Что такое эквивалентное отверстие шахты?

## **5. ШАХТНЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СЕТИ**

### **5.1. Общие сведения**

Шахтная вентиляционная сеть включает горные выработки, вентиляционные сооружения, источники движения воздуха, различные виды регуляторов и др. Горные выработки шахты в зависимости от их назначения, размеров, разветвленности и ориентации в пространстве определяют степень трудности проветривания шахты и общешахтную депрессию и являются главным показателем, характеризующим шахтную вентиляционную сеть.

К вентиляционным сооружениям относятся перемычки различного назначения, вентиляционные двери и шлюзы, кроссинги, замерные станции, вентиляционные скважины, а также надшахтные здания и сооружения на поверхности. Без вентиляционных сооружений невозможно обеспечить правильное распределение воздушных потоков в вентиляционной сети и подачу расчетного количе-

ства воздуха к местам потребления. Особенно важную роль играют вентиляционные сооружения, в частности перемычки, в аварийных ситуациях, когда требуется изолировать некоторую часть шахтного поля при эндогенных пожарах, взрывах, внезапных выбросах угля и газа, затоплениях. Поэтому в зависимости от их назначения перемычки выполняются из разных материалов по прочности, включая бетон.

В качестве источников тяги применяются вентиляторы главного и местного проветривания, создающие необходимый напор для преодоления аэродинамического сопротивления вентиляционной сети и обеспечивающие требуемое количество воздуха для поддержания безопасной концентрации метана в горных выработках. Вентиляционная сеть вместе с источниками тяги образуют вентиляционную систему, которая характеризуется способом и схемой проветривания шахты и может быть единой или секционной в зависимости от размеров шахтного поля. В случае секционной системы каждая секция имеет автономные источники тяги, а также отдельные выработки для входящей и исходящей вентиляционных струй, не связанных с другими секциями шахты. В Кузбассе до некоторого времени по такому принципу работала шахта «Распадская», однако позднее перешла на единую систему проветривания, что сыграло отрицательную роль в аварии 2010 года.

## ***5.2. Классификация шахтных вентиляционных сетей***

Шахтные вентиляционные сети могут быть представлены в виде вентиляционного плана, пространственной и аэродинамической схем. Вентиляционный план представляет собой план горных выработок, на котором помечены направления воздушных потоков, вентиляционные сооружения, контрольно-измерительные станции, количество проходящего воздуха, датчики метана, телефоны, сланцевые и водяные заслоны и др. Обычно вентиляционный план вывешивают в комнате диспетчера шахты и периодически корректируют.

Пространственная схема вентиляционной сети аналогична вентиляционному плану, но выполнена в одной линии и отражает лишь пространственное расположение горных выработок и их соединения. Она наиболее удобна для шахт, разрабатывающих пласты крутого падения, где много выработок ориентированных под

углом, близким к  $90^\circ$ , и сложная геометрия выемочных участков (рис. 5.1).

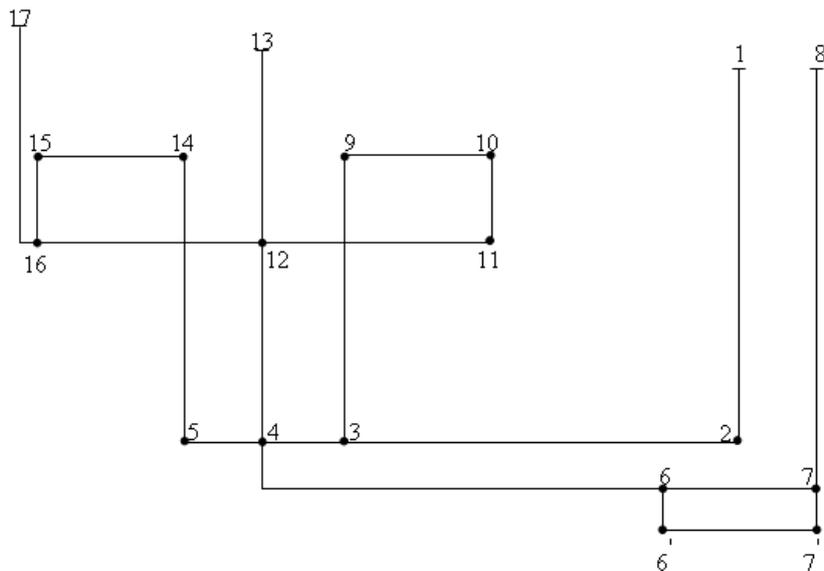


Рис. 5.1. Пространственная схема горных выработок шахты при отработке пласта в пределах двухкрылой панели

Аэродинамическая схема – это изображение вентиляционной сети в виде графа, который не отражает пространственной ориентации выработок, а дает представление только об их взаимосвязи (рис. 5.2).

Поскольку шахтная вентиляционная сеть представляет собой замкнутый связный граф, то для нее приняты следующие понятия:

- узел – место соединения трех и более выработок;
- ветвь – отдельная выработка или несколько последовательно соединенных выработок, соединяющих два узла;
- маршрут – путь в сети, включающий неповторяющиеся ветви;
- контур – замкнутый путь в сети, включающий неповторяющиеся ветви;
- ячейка – часть сети, которая не пересекается ветвями.

Для каждой замкнутой аэродинамической схемы существует топологическая зависимость

$$m = n + k - 1, \quad (5.1)$$

где  $m$  – число ветвей;  $n$  – число узлов;  $k$  – число ячеек.

В зависимости от способа связи горных выработок различают неразветвленные и разветвленные вентиляционные сети. Нераз-

ветвленная вентиляционная сеть состоит из одного простого контура последовательно соединенных горных выработок. Разветвленные вентиляционные сети могут быть параллельными и диагональными.

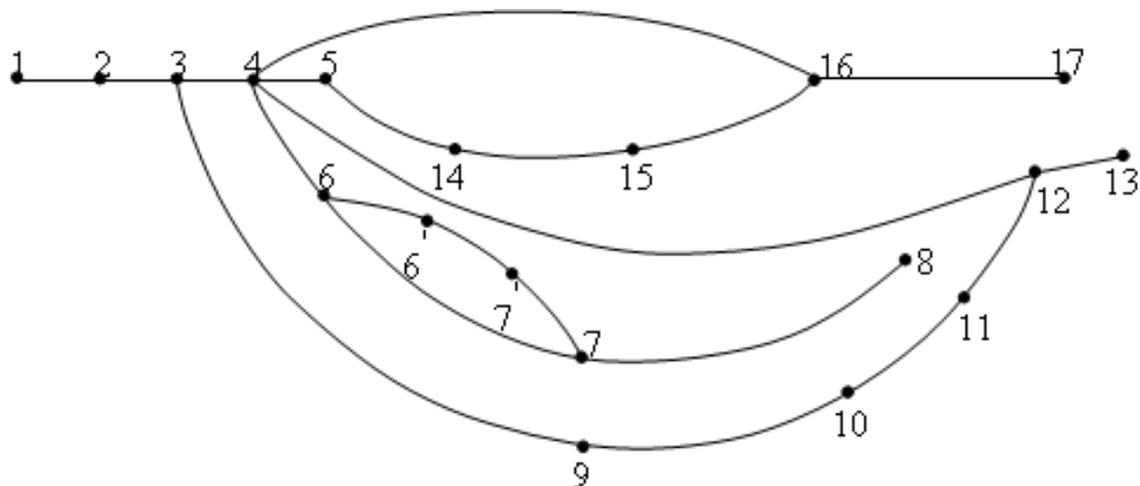


Рис. 5.2. Аэродинамическая схема, построенная на основании пространственной схемы расположения выработок, представленной на рис. 5.1

### 5.3. Основные законы движения воздуха в шахтных вентиляционных сетях

При движении воздуха в шахтных вентиляционных сетях действуют следующие законы:

– закон сопротивления  $h_i = R_i Q_i^2$ ;

– закон сохранения массы воздушных потоков  $\sum_{i=1}^n \rho_i Q_i = 0$ ;

– закон сохранения механической энергии воздушных потоков в контурах  $\sum_{i=1}^n R_i Q_i = 0$ .

На основании действия этих законов осуществляется распределение воздуха и общего сопротивления в сетях:

а) неразветвленная вентиляционная сеть (рис. 5.3, а)

В этом случае количество воздуха, проходящее по всем ветвям сети, будет постоянным, т. е.  $Q_{0-1} = Q_{1-2} = Q_{2-3} = Q_{\text{общ}}$ , а аэродинамическое сопротивление будет в каждой ветви разное

$h_{0-1} = R_{0-1}Q^2$ ,  $h_{1-2} = R_{1-2}Q^2$ ,  $h_{2-3} = R_{2-3}Q^2$  и т. д., тогда  
 $h_{\text{общ}} = R_{\text{общ}} \cdot Q^2$ ;  $R_{\text{общ}} = \sum R_i$ .

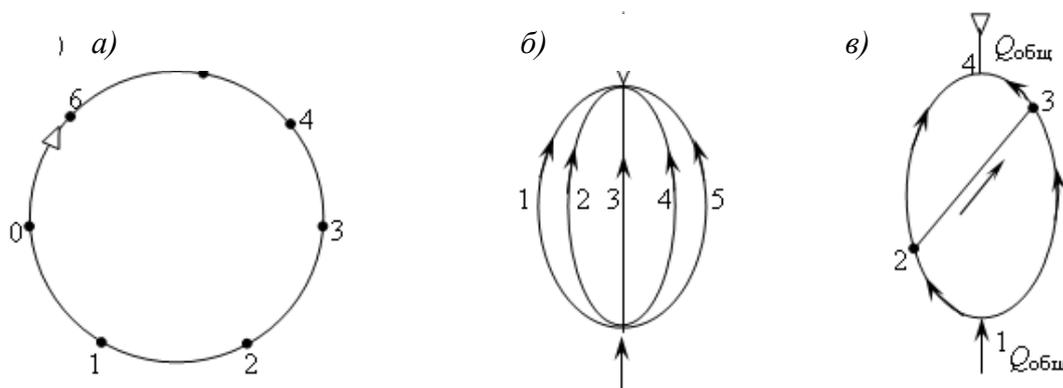


Рис. 5.3. Аэродинамические схемы вентиляционных сетей: неразветвленная (а), разветвленная, параллельная (б), и диагональная (в)

б) простая параллельная вентиляционная сеть (рис. 5.3, б)

В параллельных сетях каждая ветвь может иметь разное аэродинамическое сопротивление, следовательно, количество воздуха, протекающее по ним, будет различным  $Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3$ , тогда

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (5.2)$$

Депрессия ветвей параллельного соединения в силу того, что потоки воздуха выходят и приходят в одни и те же точки, будут одинаковыми, т. е.

$$R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2 = \dots = R_n Q_n^2. \quad (5.3)$$

Распределение воздуха в двух параллельных ветвях будет подчиняться условию

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}. \quad (5.4)$$

в) диагональная вентиляционная сеть (рис. 5.3, в)

При проектировании вентиляции шахт часто возникает необходимость соединять параллельные ветви дополнительной выработкой, называемой диагональю. Такие ситуации могут быть при последовательном проветривании двух лав с подсвежением струи, при проведении диагональной печи в длинных столбах по прости-

ранию и особенно в системах разработки крутых пластов различными вариантами слоевых систем.

Движение воздуха в диагональных соединениях может быть описано узловыми и контурными уравнениями. Узловые уравнения исходят из условия закона сохранения массы или расхода воздуха

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (5.5)$$

отсюда вытекает система уравнений для каждого узла.

$$\text{Узел 1} \quad Q_{\text{общ}} - Q_{1-2} - Q_{1-3} = 0.$$

$$\text{Узел 2} \quad Q_{1-2} - Q_{2-3} - Q_{2-4} = 0.$$

$$\text{Узел 3} \quad Q_{1-3} + Q_{2-3} - Q_{3-4} = 0.$$

$$\text{Узел 4} \quad Q_{2-4} + Q_{3-4} - Q_{\text{общ}} = 0.$$

При составлении контурных уравнений необходимо находить из того, что в любом контуре должно обеспечиваться равновесие системы, т. е. встречные потоки должны уравновешивать друг друга. Тогда для контуров I и II система уравнений будет иметь следующий вид

$$\text{Контур I} \quad R_{1-2}Q_{1-2}^2 + R_{2-3}Q_{2-3}^2 - R_{1-3}Q_{1-3}^2 = 0.$$

$$\text{Контур II} \quad R_{2-3}Q_{2-3}^2 + R_{3-4}Q_{3-4}^2 - R_{2-4}Q_{2-4}^2 = 0.$$

Направление воздушного потока в диагональной ветви 2-3 принимается условно с любым знаком. Однако если в решении системы контурных уравнений значение  $Q_{2-3}$  окажется со знаком «минус», то это будет означать, что направление движения воздуха надо поменять на обратное. Для обеспечения движения воздуха от узла 2 к узлу 3 должно выполняться условие  $R_{1-3}Q_{1-3}^2 > R_{1-2}Q_{1-2}^2$  и  $R_{2-3}Q_{2-3}^2 > R_{3-4}Q_{3-4}^2$ . Направление движения воздуха в диагональном соединении не зависит от его аэродинамического сопротивления.

#### **5.4. Источники движения воздуха в шахте**

Источниками движения воздуха в шахте являются вентиляторы, нагреватели, компрессоры, эжекторы и естественная тяга.

Шахтные вентиляторы – машины, обеспечивающие степень сжатия 1,1 (отношение давления на выходе к давлению воздуха на входе). Движение воздуха обеспечивает вращающееся в кожухе под

действием электро- или пневмодвигателя рабочее колесо с лопатками. По принципу действия вентиляторы подразделяются на центробежные и осевые, по назначению – на вентиляторы главного проветривания, вспомогательные и местного проветривания. Принцип действия вентиляторов представлен из рис. 5.4.

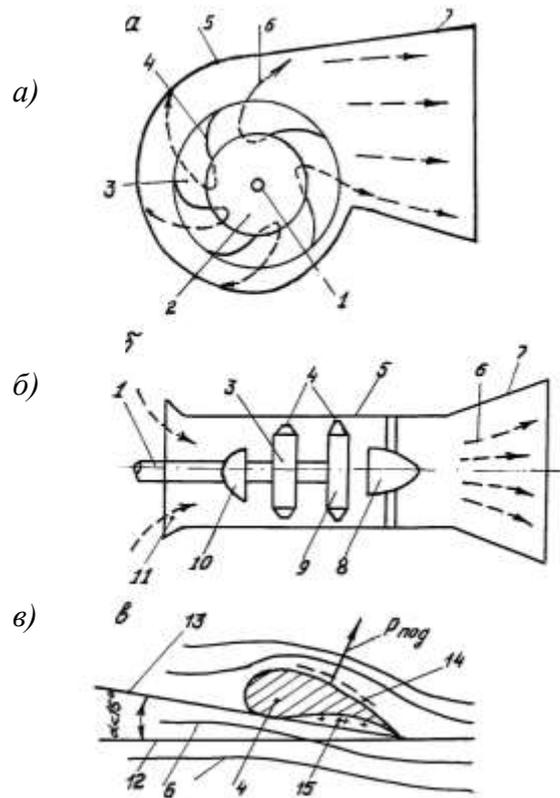


Рис. 5.4. Схемы центробежного (а) и осевого (б) вентиляторов и обтекания лопатки рабочего колеса (в): 1 – ось; 2 – всасывающее отверстие; 3 – рабочее колесо; 4 – лопатки; 5 – кожух; 6 – воздушные потоки; 7 – диффузор; 8 – хвостовик; 9 – спрямляющий аппарат (у центробежного вентилятора во всасывающем отверстии, не показан); 10 – обтекатель; 11 – входной коллектор; 12 – направление основного потока; 13 – хорда; 14, 15 – соответственно области пониженного и повышенного давления;  $P_{\text{под}}$  – подъемная сила

В центробежном вентиляторе (а) воздух засасывается через боковое отверстие (бывают вентиляторы двустороннего всасывания). Во всасывающем отверстии установлен спрямляющий аппарат – неподвижное колесо с лопатками, изменяющее направление движения воздуха с осевого на радиальное. Далее рабочим колесом воздух закручивается, сжимается и выбрасывается в пространство между колесом и спиралевидным кожухом под действием центро-

бежной силы, а затем выходит через плавно расширяющийся канал – диффузор.

В осевом вентиляторе (б) спрямляющий аппарат установлен за рабочим колесом. В отличие от центробежного он может быть реверсивным – способным изменять направление потока воздуха на противоположное. Лопатки имеют обтекаемый профиль крыла самолета (в). Огибающая лопатку с выпуклой стороны часть потока имеет большую скорость, чем с вогнутой. В результате образуется подъемная сила, сжимающая поток.

Примеры маркировки шахтных вентиляторов: ВЦД-31: В – вентилятор; Ц – центробежный; Д – двустороннего всасывания или двухступенчатый; 31 – диаметр рабочего колеса, дм; ВОД-30: В – вентилятор, О – осевой, Д – двухступенчатый, 30 – диаметр рабочего колеса, дм.

Предельные характеристики отечественных шахтных вентиляторов: центробежных –  $Q_{\max} = 700 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $h_{\max} = 9,2 \text{ кПа}$ ; осевых –  $Q_{\max} = 650 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $h_{\max} = 4,6 \text{ кПа}$ .

Нагнетатели (воздуходувки) – машины, обеспечивающие степень сжатия воздуха от 1,1 до 2. Воздух движется под действием вращающейся турбины. Применяются для проветривания выработок протяженностью несколько километров.

Компрессоры – машины, обеспечивающие степень сжатия воздуха более 2. Обычно используются в сочетании с эжекторами.

Эжектор – устройство, приводящее атмосферный воздух в движение за счет кинетической энергии сжатого воздуха из компрессора, который через сопло выбрасывается в смесительную камеру с коллектором и диффузором, аналогичную кожуху осевого вентилятора. Атмосферный воздух за счет разрежения, создаваемого при выбросе струи сжатого воздуха по оси смесительной камеры, подсасывается через коллектор и выходит через диффузор, подключенный к вентиляционной трубе. Производительность эжекторов мала – не более  $50 \text{ м}^3/\text{мин}$ . На гидрошахтах роль эжекторов выполняет гидромониторная струя. Эжекцию воздуха также осуществляет капез воды в воздухоподающем стволе.

Естественная тяга – движение воздуха в выработках под действием главным образом его различной плотности на земной поверхности и под землей, зависящей от температуры (теплый менее плотный воздух всплывает, а холодный тонет). Естественная тяга

больше зимой и ночью, чем летом и днем. При вскрытии месторождения штольнями естественную тягу может создавать напор ветра. За счет естественной тяги проветриваются в основном тоннели разного назначения.

Вентиляторы местного проветривания предназначены для проветривания тупиковых выработок в угольных и рудных шахтах при плотности воздуха до  $1,3 \text{ кг/м}^3$  и температуре от 253 до 308 К, запыленности до  $50 \text{ мг/м}^3$  и относительной влажности до 95 %. Вентиляторы местного проветривания снабжены глушителями шума, что позволяет значительно снизить звуковую мощность и использовать их в местах длительного пребывания персонала.

Основные марки вентиляторов местного проветривания, выпускаемых в РФ: ВМЭ-6, ВМЭ-6/л, ВМЭ-8, ВМЭ 2-10, ВМП-6/1, ВМП-4М, ВОЭ-5.

Наибольшее распространение в шахтах Кузбасса получил вентилятор ВМЭ-6.

#### **Техническая характеристика**

Номинальный диаметр	630 мм
Номинальная подача	$7 \text{ м}^3/\text{с}$
Полное давление	2500 Па
Максимальный полный КПД	68 %
Мощность электродвигателя	25 кВт
Уровень звуковой мощности	118 дБА
Масса комплекта	420 кг
Высота	975 мм
Ширина	750 мм

Общий вид вентилятора ВМЭ-6 представлен на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Общий вид вентилятора ВМЭ-6

### **5.5. Регулирование распределения расхода воздуха в вентиляционной сети шахты**

Ведение горных работ сопровождается непрерывным изменением аэродинамического сопротивления отдельных участков шахтной вентиляционной сети. По мере увеличения глубины горных работ изменяется газообильность очистных и подготовительных забоев, транспортных выработок, по которым движется отбитый уголь, увеличивается газовыделение из выработанных пространств и смежных угольных пластов. В связи с этим возникает необходимость обеспечивать регулирование распределения воздуха между отдельными участками вентиляционной сети без изменения режима работы главного вентилятора.

Различают положительное и отрицательное регулирование. Ветвь, в которой количество воздуха уменьшается, называется ослабляемой, соответственно ветвь, в которой количество воздуха увеличивается, называется усиливаемой. Регулирование, вызывающее увеличение аэродинамического сопротивления участка сети, называется отрицательным. В этом случае сокращается расход воздуха в ослабляемой ветви и увеличивается в усиливаемой ветви. Отрицательное регулирование вызывает дополнительный расход энергии. В качестве дополнительного сопротивления используются вентиляционные окна, перемычки, воздушные завесы, пластинчатые поворотные регуляторы и другие сооружения, вызывающие искусственное аэродинамическое сопротивление в ослабляемой ветви.

Вентиляционные окна устанавливаются в глухих перемычках, служащих для выравнивания перепадов давления для обеспечения постоянного соотношения расхода воздуха по ветвям. Глубина регулирования с использованием вентиляционных окон сравнительно небольшая, что объясняется нелинейным законом изменения аэродинамического сопротивления. Изменение аэродинамического сопротивления такого окна достигается заслонкой жалюзийного типа (рис. 5.6).

Вентиляционные окна создают дополнительное местное сопротивление, на что затрачивается часть энергии потока:

$$R_{\text{д}} = R_1 m^2 - R_2, \quad (5.6)$$

где  $R_1, R_2$  – первоначальное сопротивление ветвей параллельного соединения,  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^8$ ;  $m$  – заданное соотношение расхода воздуха в ветвях  $Q_1 / Q_2$ .

Потери давления на преодоление сопротивления отрицательного регулятора определяются по формуле

$$h = \frac{\rho}{2}(V_2 - V_1)^2, \quad (5.7)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $V_1, V_2$  – средняя скорость движения воздуха в сечениях I-I и II-II,  $\text{м}/\text{с}$  (рис. 5.6).

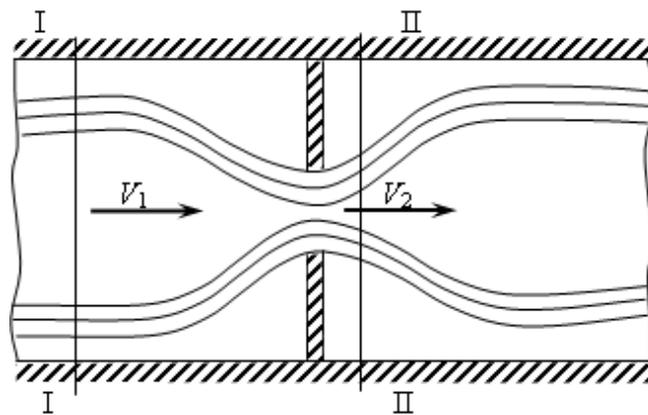


Рис. 5.6. Схема движения воздуха через вентиляционное окно

Площадь окна в вентиляционной перемычке при известном значении депрессии, которую оно должно издавать, определяется по формуле

$$S_{\text{ок}} = \frac{QS_{\text{в}}}{0,65Q + 0,84S_{\text{в}}\sqrt{h}}, \quad (5.8)$$

где  $S_{\text{в}}$  – площадь поперечного сечения выработки в месте установки окна,  $\text{м}^2$ ;  $Q$  – расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

Вентиляционные окна должны устанавливаться в выработках, где нет интенсивного движения транспорта. В выработках, где есть интенсивное движение транспорта целесообразно устанавливать дверные проемы или пластинчатые поворотные регуляторы, открывающиеся автоматически с пульта диспетчера.

Расчет дверных проемов исходит из назначения выработки и ее площади. Предварительно задается соотношение площадей

дверного проема и выработки  $S_{д.п} : S_{в}$ . Затем по формулам (5.9), (5.10) определяется общее сопротивление дверного проема и его коэффициент местного сопротивления:

$$\zeta = 2,4 \left( \frac{S_{в}}{S_{д.п}} - 0,65 \right)^2 \text{ при } \frac{S_{д.п}}{S_{в}} \leq 0,5; \quad (5.9)$$

$$\zeta = 2,89 \left( \frac{S_{в}}{S_{д.п}} - 1 \right)^2 \text{ при } \frac{S_{д.п}}{S_{в}} \geq 0,5. \quad (5.10)$$

Пластинчатые поворотные регуляторы устанавливаются на некотором расстоянии друг от друга в выработках, предназначенных для движения транспортных средств. Они устроены так, что позволяют изменять угол встречи пластин с воздушным потоком от 0 до 90°. При необходимости датчик скорости или давления передает сигнал в аппаратуру или на пульт диспетчера, после чего исполнительный механизм приводит в движение двигатель и пластины поворачиваются на такой угол, который обеспечивает восстановление требуемых значений давления или скорости (рис. 5.7).

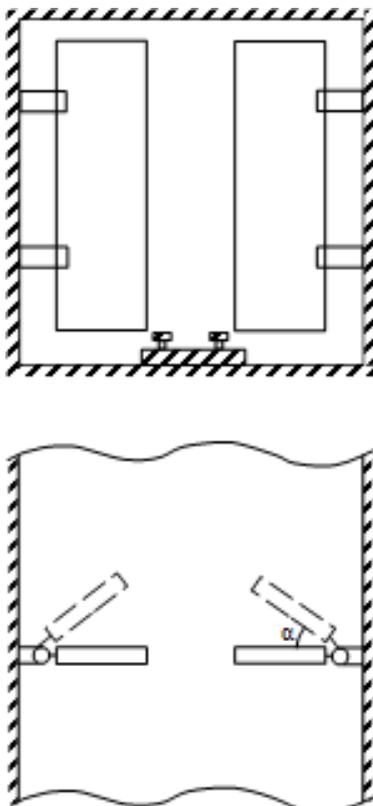


Рис. 5.7. Схема работы пластинчатых поворотных регуляторов в горной выработке

Пластинчатые поворотные регуляторы рассчитываются по максимальному значению их сопротивления. Общее дополнительное сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{д}} = R_1 \cdot m^2 - R_2, \quad (5.11)$$

где  $R_1, R_2$  – первоначальное сопротивление ветвей параллельного соединения;  $m$  – заданный расход воздуха в ветвях ( $Q_1 / Q_2$ ).

Затем в зависимости от типа и схемы расположения пластин определяются максимальные значения коэффициента местного сопротивления:

для одной пластины

$$\zeta_{\text{max}} = 5,5 \left( \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{пл}}} - 1 \right)^2; \quad (5.12)$$

для двух пластин

$$\zeta_{\text{max}} = 26,3 \left( \frac{S_{\text{в}}}{S_{\text{пл}}} - 1 \right)^2. \quad (5.13)$$

Максимальное сопротивление одного регулятора определяется по формуле

$$R_{\text{пл}} = 0,6 \zeta_{\text{max}} / S_{\text{в}}^2. \quad (5.14)$$

Расстояние между пластинами при  $S_{\text{пл}} / S_{\text{в}} = (0,65 \div 1,0)$  определяется по формуле

$$\ell = 40 \left( 1 - \frac{S_{\text{пл}}}{S_{\text{в}}} \right). \quad (5.15)$$

Кроме этого в качестве средств регулирования расхода воздуха в ветвях вентиляционной сети используются воздушные завесы. Ветвь, в которой надо уменьшить расход воздуха, перекрывается воздушной завесой, создаваемой взвихривающей установкой. Собственно регулирование осуществляется изменением угла встречи двух потоков и скорости движения воздуха в завесе, что обеспечивается вентилятором, засасывающим воздух из выработки и пода-

ющим его к направляющему устройству в виде канала клиновидной формы. Клиновидная форма обеспечивает равномерный выпуск воздуха по всей длине раздающего устройства, что позволяет перекрыть частично или полностью поток воздуха в ослабляемой ветви.

Аэродинамическое сопротивление завесы может быть определено по формуле (5.6). Площадь выработки, не перекрываемая завесой, (площадь окна) определяется по формуле (5.8).

Расход воздуха, необходимый для образования завесы, определяется по формуле

$$Q_3 = \frac{v_H \cdot d_{\text{щ}} \cdot S_B}{\sqrt{d_{\text{щ}} \cdot \cos \alpha}} \left( 1 - \frac{1}{1 + a \cdot S_B \sqrt{R_d}} \right), \quad (5.16)$$

где  $v_H$  – скорость движения воздуха до установки завесы, м/с;  $d_{\text{щ}}$  – ширина щели завесы, м;  $\alpha$  – коэффициент (при  $S_{\text{ок}}/S_B < 0,5$   $\alpha = 0,2$  и при  $S_{\text{ок}}/S_B > 0,5$   $\alpha = 0,24$ );  $R_d$  – аэродинамическое сопротивление.

Депрессия вентилятора, создающего завесу, равна

$$h_B = h_{\text{ст}} + h_{\text{вен}} + h_{\text{ск}}, \quad (5.17)$$

где  $h_{\text{ст}}$  – статическая депрессия, теряемая в подводящем трубопроводе;  $h_{\text{вен}}$  – статическая депрессия, теряемая в канале вентилятора;  $h_{\text{ск}}$  – скоростная депрессия на выходе из щели завесы.

Регулирование, не вызывающее увеличения аэродинамического сопротивления выработок, называется положительным. Оно осуществляется путем уменьшения аэродинамического сопротивления в усиливаемой ветви, при сохранении расхода воздуха в ослабляемой ветви. Уменьшение аэродинамического сопротивления в усиливаемой ветви может быть обеспечено увеличением поперечного сечения выработок, уменьшением шероховатости их поверхности, освобождением от нагромождений ненужных материалов и оборудования, заменой крепи и т. д. Также увеличение расхода воздуха в усиливаемой ветви может быть достигнуто установкой в ней вентилятора местного проветривания, подающего дополнительное количество воздуха (рис. 5.8).

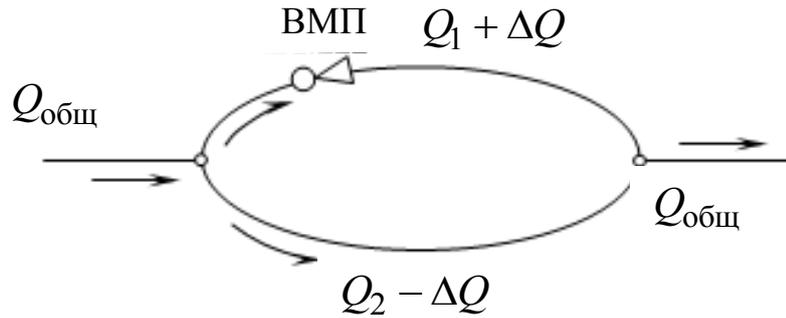


Рис. 5.8. Вариант положительного регулирования распределения воздуха в сети с помощью вентилятора местного проветривания, установленного в усиливаемой ветви

При внутришахтном регулировании расхода воздуха исходят из необходимой глубины регулирования, под которой понимается отношение нормального расхода воздуха к его увеличенному или уменьшенному значению. Так как на шахтах чаще используется отрицательное регулирование, то необходимо исходить из допустимого уменьшения расхода воздуха в ослабляемой ветви, при котором не будут нарушены требования аэрологической безопасности.

Уменьшение аэродинамического сопротивления выработок наиболее рациональный способ регулирования расхода воздуха в шахтной вентиляционной сети. При положительном регулировании расход воздуха в усиливаемой ветви увеличивается с  $Q'_1$  до  $Q_1$ , а расход воздуха в ослабляемой ветви уменьшается с  $Q'_2$  до  $Q_2$ . Принимая общее количество воздуха  $Q_0$  неизменным, получаем новый расход воздуха в усиливаемой ( $Q_1$ ) и ослабляемой ( $Q_2$ ) ветвях:

$$Q = Q'_1 + Q'_2 = Q_1 + Q_2, \quad (5.18)$$

где  $Q'_1$  и  $Q'_2$  – прежние расходы воздуха в параллельных струях.

Соответственно депрессии в параллельных ветвях составят

$$h_1 = R_1 Q_1^2; \quad (5.19)$$

$$h_2 = R_2 Q_2^2.$$

Это будет возможным, если аэродинамическое сопротивление  $R_1$  будет снижено до значения

$$R_1 = R_2 \frac{Q_2^2}{Q_1^2}. \quad (5.20)$$

Уменьшить аэродинамическое сопротивление можно путем уменьшения коэффициента аэродинамического сопротивления до значения

$$\alpha = \frac{R_1 S_B^2}{LP} \quad (5.21)$$

где  $L, P, S_B$  – соответственно длина, периметр и площадь сечения выработки в усиливаемой ветви.

По найденному значению  $\alpha$  подбирается соответствующий вид крепи.

### ***5.6. Изменение режима работы главного вентилятора***

Изменение общего количества воздуха, поступающего в шахту, может быть достигнуто изменением производительности и напора вентилятора. Конструктивное исполнение вентиляторов главного проветривания шахт и рудников позволяет обеспечивать изменение их дебита и напора путем соответствующих регулировок без замены основного агрегата. Эти регулировки включают:

- изменение угла установки лопаток рабочего колеса (для осевых вентиляторов);
- угла установки лопаток направляющего аппарата;
- угла поворота закрылков лопаток рабочего колеса (для центробежных вентиляторов);
- частоты вращения рабочего колеса вентилятора.

Лопатки рабочего колеса могут поворачиваться на угол  $15\text{--}50^\circ$ , что позволяет плавно менять производительность и давление осевого вентилятора соответственно в 4–5 и 3–4 раза. Изменение угла установки лопаток рабочего колеса и лопаток направляющего аппарата производится при остановленном вентиляторе специальной бригадой завода изготовителя или работниками собственной механической службы, имеющими право производства подобных работ.

Изменение частоты вращения рабочего колеса обеспечивает получение следующих значений производительности и напора (депрессии) вентилятора:

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}; \quad (5.22)$$

$$h_2 = h_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (5.23)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – производительность вентилятора до и после изменения частоты вращения рабочего колеса, м<sup>3</sup>/мин;  $n_1, n_2$  – частота вращения рабочего колеса до и после регулировок, мин<sup>-1</sup>;  $h_1, h_2$  – депрессия, развиваемая вентилятором до и после регулировок, Па.

За счет подобных регулировок главный вентилятор шахты может длительное время работать на шахтную сеть со все возрастающей депрессией и потребностью в воздухе, что позволяет избежать частой замены вентиляционных агрегатов или установки второго вентилятора. Однако по мере исчерпания всех возможностей регулирования, предусмотренных конструкцией вентилятора, его необходимо заменять на более производительный.

### **5.7. Естественная тяга**

Естественная тяга – это разность давлений в горных выработках, создаваемое естественными факторами: разностью плотности воздуха на поверхности и в шахте, ветром, капежом и потоками воды в вертикальных выработках и др. Энергия, которую получает воздух от этих источников, называется депрессией естественной тяги. Ввиду малых значений депрессия естественной тяги не может применяться для проветривания шахт самостоятельно, что запрещено Правилами безопасности в угольных шахтах. Вместе с тем она может оказывать некоторое влияние на работу вентиляторов главного проветривания в зависимости от времени года, а иногда и суток, увеличивая напор вентилятора или снижая его. В частности, при низкой наружной температуре холодный воздух легко опускается вниз по стволу и при нагнетательном способе проветривания, направление движения воздуха, создаваемое вентилятором, совпадает с направлением естественной тяги. В теплое время года при

высокой наружной температуре эти направления взаимно противоположны. Таким образом, можно сказать, что влияние естественной тяги на проветривание шахт имеет сезонный характер.

Для примера рассмотрим формирование депрессии естественной тяги в двух смежных стволах (рис. 5.9).

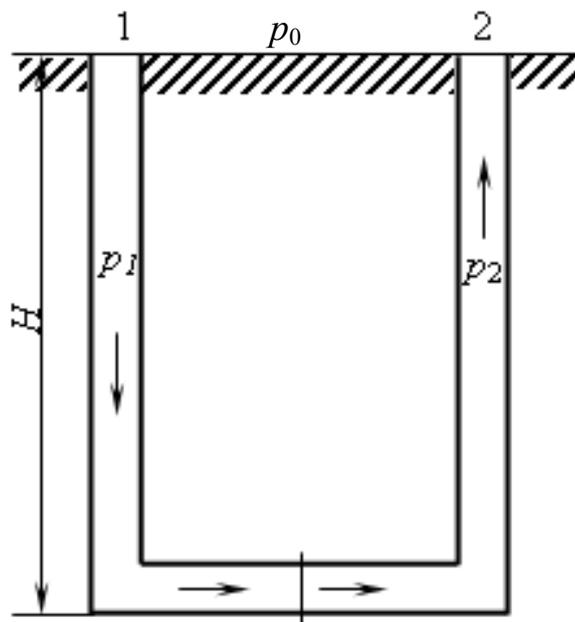


Рис. 5.9. Схема к определению депрессии естественной тяги в двух сообщающихся стволах

Пусть два ствола заполнены воздухом плотностью  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Определяем давление на разделяющую перемычку.

В стволе 1 давление на перемычку равно  $P_0 + g\rho_2 H$ . Разность давлений равна  $g(\rho_1 - \rho_2)H$ . Это и будет депрессией естественной тяги в выработке между стволами.

В случаях когда на шахте имеется несколько действующих горизонтов, естественная тяга будет разной для каждого из них (рис. 5.10).

Депрессия естественной тяги с изменением глубины шахты изменяется экспоненциально. В глубоких шахтах вследствие высокой температуры воздуха в исходящих струях депрессия естественной тяги совпадает с направлением работы вентилятора и является положительной.

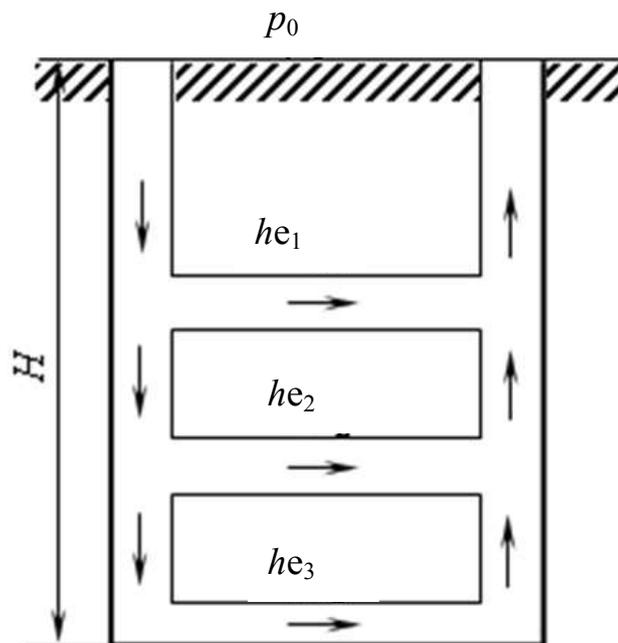


Рис. 5.10. Схема к определению естественной тяги при нескольких горизонтах

Вместе с тем необходимо заметить, что существует ряд объектов, которые проветриваются исключительно за счет депрессии естественной тяги. Это автомобильные и железнодорожные тоннели, тоннели метрополитенов, подземные паркинги и торговые центры крупных городов, подземные переходы и др.

### **5.8. Вентиляционные режимы при авариях**

Из всех видов аварий в угольных шахтах, которые оказывают прямое воздействие на вентиляционную систему, наиболее характерными являются эндогенные и экзогенные пожары, а также взрывы пыли, метановоздушной смеси, внезапные выбросы угля и газа, что бывает значительно реже. При всех упомянутых авариях происходит возмущение в системе вентиляции шахты в результате изменения плотности воздуха и появления источника повышенного давления, волна которого распространяется по горным выработкам и может опрокинуть вентиляционную струю вплоть до выхода на поверхность. Из всех упомянутых видов аварий реальная возможность управления вентиляционным режимом существует только при пожарах.

Основные места возникновения пожаров на угольных шахтах – это надшахтные здания воздухоподающих или воздуховыдающих стволов, шурфы, тупиковые выработки, очистные забои и, конечно,

выработанные пространства, где могут возникать очаги эндогенных пожаров. Вентиляционный режим при любом пожаре сводится, как правило, к перераспределению воздушных потоков с целью не допустить проникновение продуктов горения в горные выработки шахты, где находятся люди. В случае пожара в надшахтном здании воздухоподающего ствола при всасывающем способе проветривания для предупреждения поступления в шахту пожарных газов необходимо реверсировать вентиляционную струю и закрыть противопожарные ляды в устье ствола для создания подпора. При пожаре в надшахтном здании воздухоотводящего ствола при всасывающем способе проветривания вентилятор работает в прежнем режиме на пониженном дебите. В тех случаях, когда пожар возникает на одном из вентиляционных стволов на флангах шахтного поля, режим работы вентилятора, установленного в воздухоподающем стволе в центре шахтного поля, не меняется.

Наиболее сложный случай – возникновение пожара в лаве или прилегающей к ней выработке, по которой подается воздух. Решение об изменении режима вентиляции зависит от взаимного положения места возникновения пожара, горнорабочих, находящихся на смене, и направления движения пожарных газов. В зависимости от этого режим остается прежним либо реверсируется, а также возможен нулевой режим, т. е. полная остановка вентилятора на время выхода людей из опасной зоны, создаваемой пожаром. Все возможные ситуации обязательно отражаются в плане ликвидации аварии на каждой шахте и в случае наступления какой-либо позиции дежурный диспетчер моментально дает команду на изменение режима работы главного вентилятора.

### **Контрольные вопросы к главе 5**

1. Что представляет собой шахтная вентиляционная сеть?
2. Основные законы движения воздуха в шахтной вентиляционной сети.
3. Источники движения воздуха в шахтной вентиляционной сети.
4. Регулирование распределения воздуха в шахтной вентиляционной сети.
5. Изменение режима работы главного вентилятора.
6. Работа вентиляторов на шахтную сеть.
7. Естественная тяга, ее влияние на работу главного вентилятора.

## 6. ВЕНТИЛЯЦИЯ ШАХТ

### 6.1. Способы вентиляции шахт

Для обеспечения движения воздуха по горным выработкам необходимо создать определенный перепад давления на пути его движения. В зависимости от способа создания необходимого перепада давления различают нагнетательный, всасывающий и нагнетательно-всасывающий способы вентиляции шахт (рис. 6.1).

В такой последовательности один способ заменяют другим по мере углубки шахты с ростом газоносности пластов, газообильности выработок и аэродинамического сопротивления вентиляционной сети.

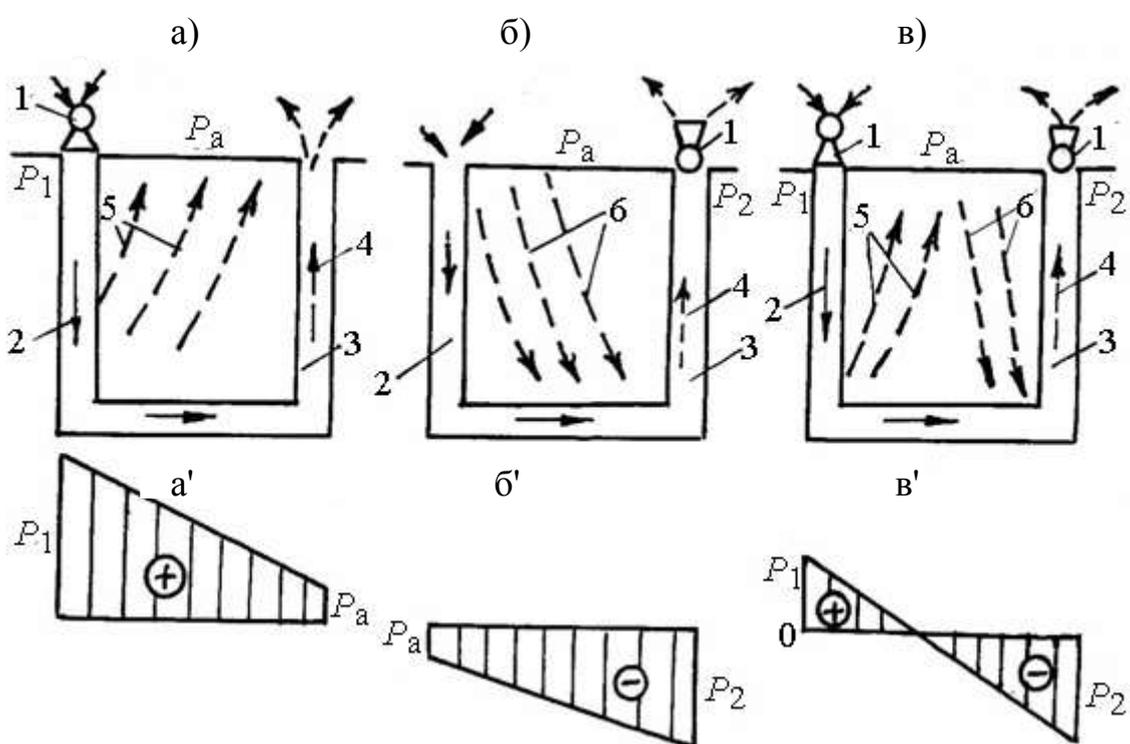


Рис. 6.1. Нагнетательный (а), всасывающий (б) и нагнетательно-всасывающий (в) способы вентиляции шахт и соответствующее им давление воздуха в шахте (а', б', в'):

- 1 – главный вентилятор; 2 – воздухоподающий ствол;
- 3 – воздухоотводящий ствол; 4 – исходящая струя;
- 5 – утечки воздуха; 6 – подсосы воздуха

При нагнетательном способе (рис. 6.1, а) главный вентилятор нагнетает воздух в шахту с поверхности через воздухоподающий

ствол, у устья которого создается избыточное давление  $P_1$ , а в устье воздухоотводящего ствола оно остается равным атмосферному  $P_a$ . В результате в выработках шахты возникает перепад давления (компрессия)

$$h = P_1 - P_2. \quad (6.1)$$

Способ применяется на неглубоких шахтах с небольшим метановыделением при аэродинамической связи выработок с земной поверхностью через выработанное пространство, трещины и провалы, что исключает подсосы воздуха в шахту и при самовозгорании угля оксид углерода не попадает в действующие выработки. Но при аварийной остановке главного вентилятора давление воздуха в действующих выработках упадет, и в них будет поступать метан из выработанного пространства.

При всасывающем способе (рис. 6.1, б) главный вентилятор отсасывает воздух из шахты, а свежий воздух засасывается через воздухоподающий ствол за счет разрежения и в шахте создается депрессия

$$h = P_a - P_2, \quad (6.2)$$

где  $P_2$  – давление воздуха перед всасывающим вентилятором.

Всасывающий способ применяется на глубоких метанообильных шахтах. При аварийной остановке главного вентилятора давление воздуха в действующих выработках повысится и метан будет засасываться из них в выработанное пространство. Способ нельзя применять на неглубоких шахтах при добыче самовозгорающегося угля. Самовозгорание интенсифицируют подсосы атмосферного воздуха, и оксид углерода будет поступать в действующие выработки.

При нагнетательно-всасывающем способе (рис. 6.1, в) у устья воздухоподающего ствола создается избыточное давление  $P_1$ , а у устья воздухоотводящего ствола – разрежение  $P_2$  соответственно нагнетательным и всасывающим вентиляторами. Депрессия шахты равна

$$h = P_1 - P_2. \quad (6.3)$$

Данный способ применяется при большом аэродинамическом сопротивлении вентиляционной сети, когда протяженность выработок велика. Участки пластов самовозгорающегося угля располагают в области с давлением, близким к атмосферному, где утечки и подсосы воздуха через выработанное пространство минимальны.

## 6.2. Схемы вентиляции шахт

Схемы вентиляции шахты бывают: фланговая, центральная и комбинированная (рис. 6.2). В такой последовательности одна сменяет другую по мере углубки шахты.

При фланговой схеме (рис. 6.2, а) воздух поступает в шахту через ствол в центре поля, а выходит через стволы или шурфы на его флангах. Схема применяется на неглубоких шахтах, когда нецелесообразно поддерживать единый вентиляционный горизонт. Разновидностями фланговой схемы являются крыльевая (рис. 6.2, а) и участковая (каждый участок имеет обособленную исходящую струю на свой шурф).

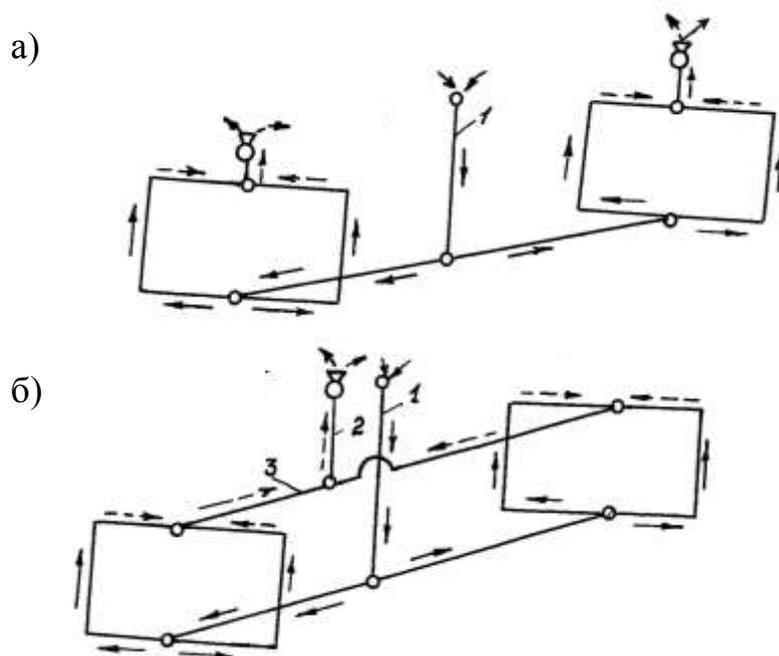


Рис. 6.2. Фланговая (а) и центральная (б) схемы вентиляции шахт:

1 – воздухоподающий ствол; 2 – воздухоотводящий ствол;  
3 – вентиляционный горизонт; сплошные стрелки – свежая струя;  
пунктирные – нисходящая

При центральной схеме (рис. 6.2, б) воздух поступает в шахту и выдается из нее через стволы в центре шахтного поля. Схема применяется при небольших размерах шахтного поля, небольшой мощности шахты, при разработке глубоких горизонтов.

Комбинированная схема – сочетание центральной и фланговой схем. Свежий воздух подается по центральному стволу, а исходящая струя выдается по расположенному рядом центральному стволу и по фланговым стволам. При такой схеме участки в центре и на флангах поля проветриваются отдельно, что удобно в случае аварии.

### ***6.3. Схемы вентиляции выемочных участков***

В вентиляции шахт к выемочным участкам относится система выработок, включающая очистной забой и подводящие к нему выработки. Учитывая широкий спектр горногеологических условий угольных шахт России, варианты расположения выработок в пределах выемочных участков могут быть различными. Основными факторами, определяющими конфигурацию и взаимное расположение выработок выемочного участка, являются угол падения и мощность угольных пластов. В соответствии с конкретными условиями их залеганий применяются и схемы вентиляции выемочных участков, представляющие собой план горных работ с нанесенным на него направлением движения свежей и исходящей струй. От правильно выбранной схемы вентиляции выемочного участка зависит надежность проветривания очистных забоев и благоприятная аэрогазовая ситуация шахты в целом.

Современные тенденции развития подземной угледобычи с использованием высокопроизводительных выемочных комплексов нового поколения характеризуются переходом шахт на разработку мощных и средней мощности пластов пологого падения, где есть условия для внедрения подобной технологии. Наиболее приемлемой в данной ситуации является система разработки длинными столбами по простиранию с обрушением кровли, применяющаяся практически во всех угольных шахтах России.

Варианты схем проветривания выемочных участков при данной системе разработки представлены на рис. 6.3. Приведенные на рис. 6.3 схемы проветривания являются базовыми, которые в зависимости от конкретных условий могут корректироваться путем

нанесения дополнительных выработок. Выбор какой-либо схемы проветривания зависит от горно-геологических условий залегания угольных пластов каждого месторождения.

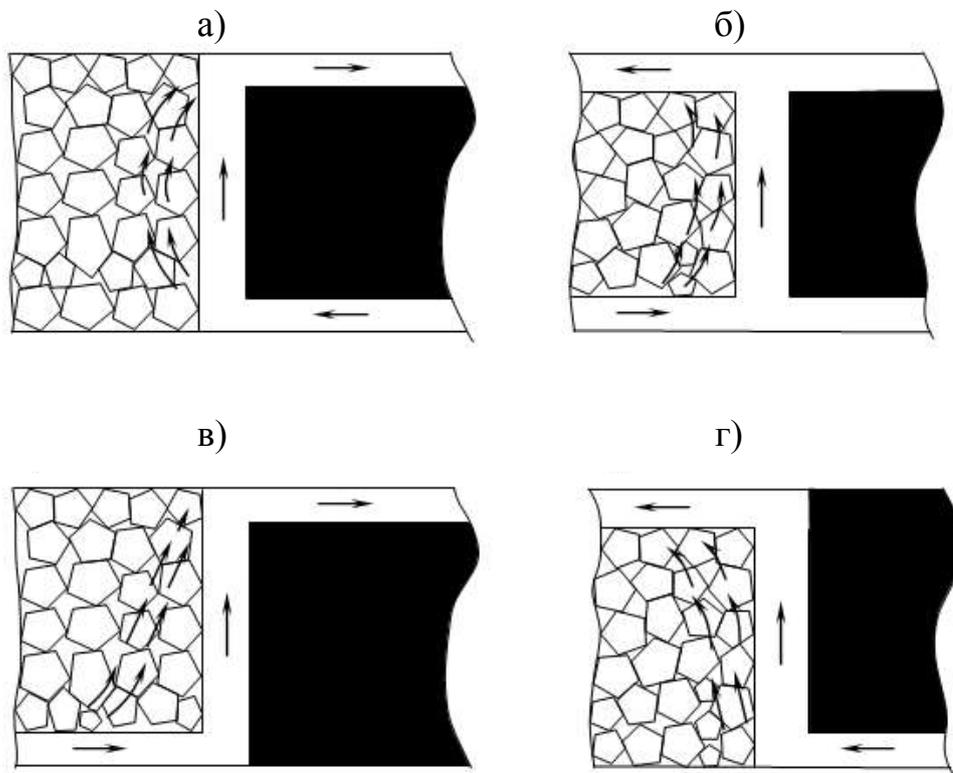


Рис. 6.3. Схемы проветривания выемочных участков при отработке пологих угольных пластов системой длинных столбов по простиранию с обрушением кровли: возвратноточная на массив (а), возвратноточная на завал (б), прямоточная (Z-образная) на массив (в), прямоточная (Z-образная) на завал (г)

Схемы проветривания выемочных участков при разработке пологих и наклонных пластов подразделяются на прямоточные, возвратноточные и комбинированные. В пределах каждой схемы проветривание очистного забоя (лавы) может быть восходящим или нисходящим. При работе высокопроизводительных очистных забоев, где за один проход комбайна отторгается до 1000 тонн свежееотбитого угля, поступающего впоследствии на ленточный конвейер в конвейерном штреке, создается тяжелая аэрогазовая ситуация, связанная с вторичным поступлением газа с вентиляционной струей снова в очистной забой. В этом случае восходящее проветривание будет создавать дополнительные трудности, связанные с постоянным превышением допустимой концентрации метана в 1 % и авто-

матическим отключением электроэнергии на участке. Если угол падения пласта не превышает  $10^\circ$ , то возможен вариант прямоточной схемы проветривания на массив с нисходящим проветриванием, т. е. с подачей свежей струи через вентиляционный штрек, где нет источников метановыделения. В этом случае газ, содержащийся в исходящей струе очистного забоя и поступающий из конвейерного штрека, удаляется за пределы выемочного участка через фланговую выработку (рис. 6.4, а).

При углах падения пласта более  $10^\circ$ , где восходящее проветривание является обязательным, параллельно с вентиляционным необходимо проходить второй штрек для отвода исходящей струи из очистного забоя, который будет служить как газодренажный (рис. 6.4, б). Подобная практика многострековой подготовки широко применяется в передовых угледобывающих странах. С некоторых пор это стало применяться и на шахтах России.

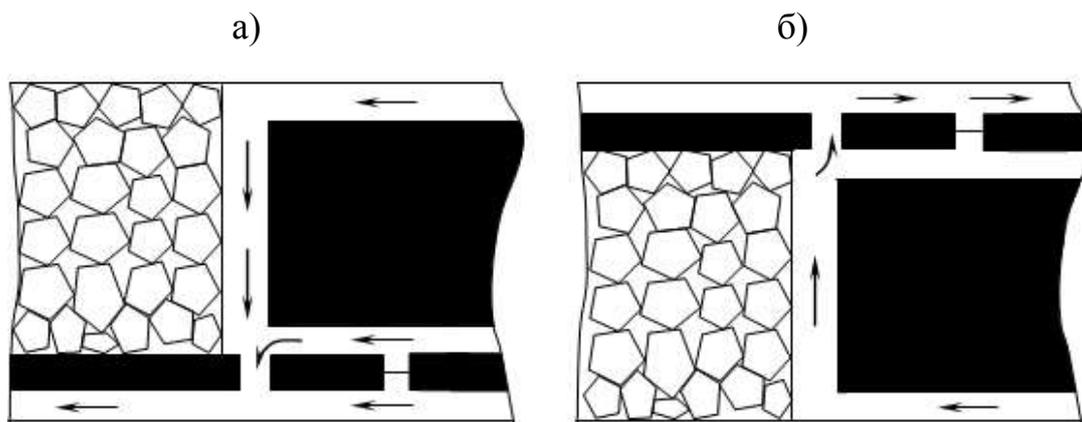


Рис. 6.4. Варианты схем проветривания выемочных участков при нисходящем (а) и восходящем (б) направлении вентиляционной струи при высокой газообильности очистного забоя

Что касается возвратноточной схемы проветривания с огибанием выработанного пространства (рис. 6.3, б), то в Кузбассе она никогда не применялась ввиду того, что поддержание конвейерного и вентиляционного штреков в завале весьма затруднительно и экономически нецелесообразно, кроме того, она создает утечки воздуха через завал, а это может способствовать зарождению очагов эндогенных пожаров при разработке пластов, склонных к самовозгоранию. В Донбассе данная схема находила широкое применение, так как антрациты не склонны к самовозгоранию, и была практически единственной при разработке пластов малой мощности сплош-

ными системами. Следует напомнить, что при сплошных системах разработки столб не нарезается на всю длину, а вентиляционный и конвейерный штреки следуют за лавой с некоторым опережением.

На рисунках 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8 приведены схемы вентиляции выемочных участков при разработке мощных пластов крутого падения в Кузбассе (Прокопьевско-Киселевский район).

На рис. 6.5 дана схема вентиляции щитового участка, где выработанное пространство находится всегда выше очистного забоя. По мере опускания щита угольные столбы разрушаются буровзрывным способом и уголь спускается по углеспускным печам на основной штрек, откуда транспортируется к стволу. Вентиляционная струя подается через крайнюю левую печь и через подщитовое пространство уходит на вентиляционный штрек следующего щитового столба.

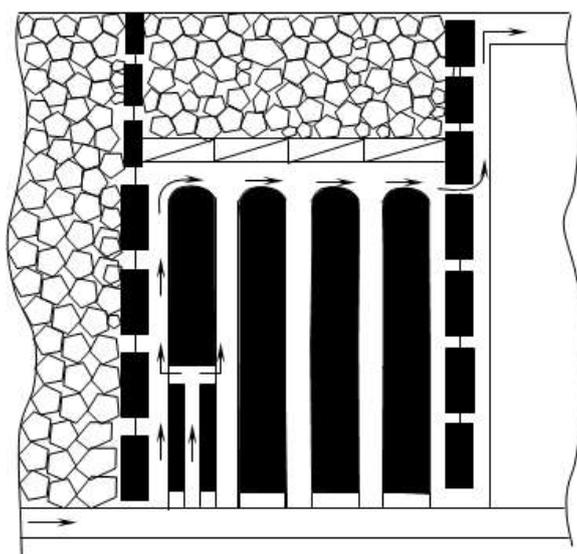


Рис. 6.5. Схема вентиляции выемочного участка, обрабатываемого щитовой системой разработки

На рисунках 6.6, 6.7, 6.8 приведены схемы проветривания выемочных участков при разработке мощных угольных пластов крутого падения различными вариантами слоевых систем с закладной выработанного пространства.

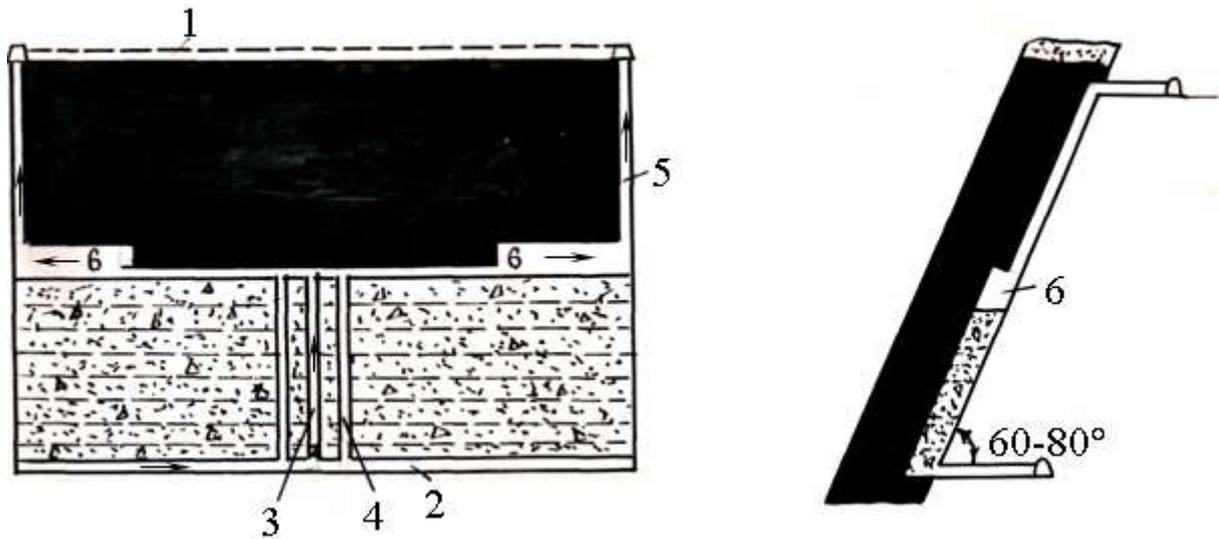


Рис. 6.6. Схема вентиляции выемочного участка при отработке нижнего слоя мощного пласта системой наклонных слоев с гидрозакладкой: 1 – вентиляционный штрек; 2 – откаточный штрек; 3 – углеспускная печь; 4 – дренажная печь; 5 – вентиляционный скат; 6 – очистные забои

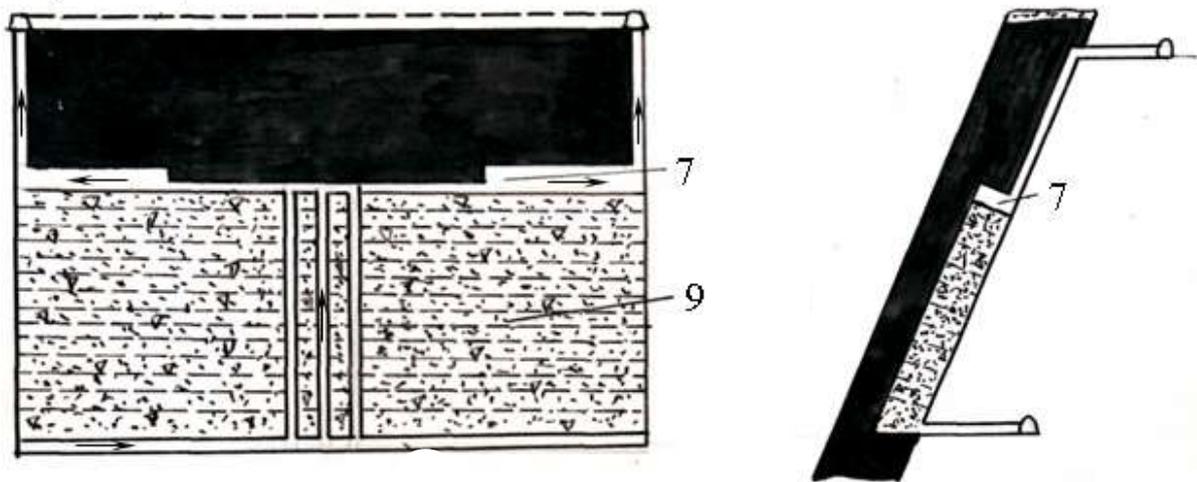


Рис. 6.7. Схема вентиляции выемочного участка при отработке нижнего слоя мощного пласта системой поперечно-наклонных слоев с гидрозакладкой: 7 – вентиляционный скат; 9 – закладочный массив

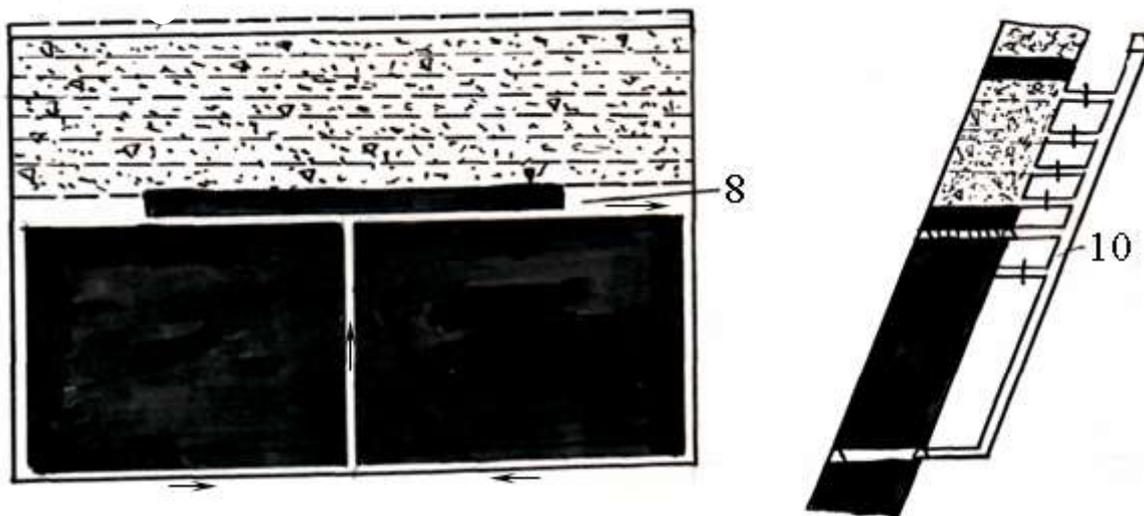


Рис. 6.8. Схема вентиляции выемочного участка при отработке мощного пласта системой горизонтальных слоев с гидрозакладкой:  
8 – очистной забой; 10 – полевой вентиляционный скат

Закладка выработанного пространства уменьшает сдвигание вмещающих пород и смежных угольных пластов, в результате чего газовый баланс участка формируется в основном за счет самого разрабатываемого пласта, включая вынимаемый слой и временно невынимаемую толщу. Все приведенные схемы вентиляции выемочных участков при разработке мощных пластов крутого падения, как с обрушением, так и с закладкой выработанного пространства, в настоящее время практически не применяются в Кузбассе. Однако любой горный инженер должен иметь о них общее представление как об определенном этапе развития технологии разработки угольных месторождений в разных угольных бассейнах страны. К настоящему времени сохранились слоевые системы разработки только на мощных пластах пологого падения. Однако технологическая схема выемки каждого слоя в таком пласте аналогична отработке пласта на полную мощность с той лишь разницей, что под рабочим слоем находится невынимаемая угольная толща, предназначенная для последующей выемки. Все слои отрабатываются с обрушением кровли.

#### 6.4. Схемы вентиляции тупиковых выработок

Строительство и эксплуатация угольных и рудных шахт связаны с необходимостью проведения большого количества выработок разного назначения. При современных тенденциях строительства шахт в Кузбассе, где вскрытие месторождений проводится наклонными стволами, существенно увеличивается их длина и объем работ по их проходке. Также резко возросли размеры нарезаемых столбов по простиранию и очистных забоев по падению, что создает определенные проблемы в проветривании подготовительных выработок в процессе их проведения.

По характеру проведения выработки делятся на сквозные и тупиковые. Сквозные выработки могут проветриваться за счет общешахтной депрессии. Тупиковые выработки требуют дополнительных средств для проветривания и удаления вредных примесей в атмосфере. Особенностью проветривания таких выработок является то, что свежая струя воздуха и исходящая должны проходить по одной и той же выработке по всей ее протяженности; организация вентиляции в этих случаях осуществляется с помощью вентиляторов местного проветривания и гибких или жестких вентиляционных труб (рис. 6.9, 6.10).

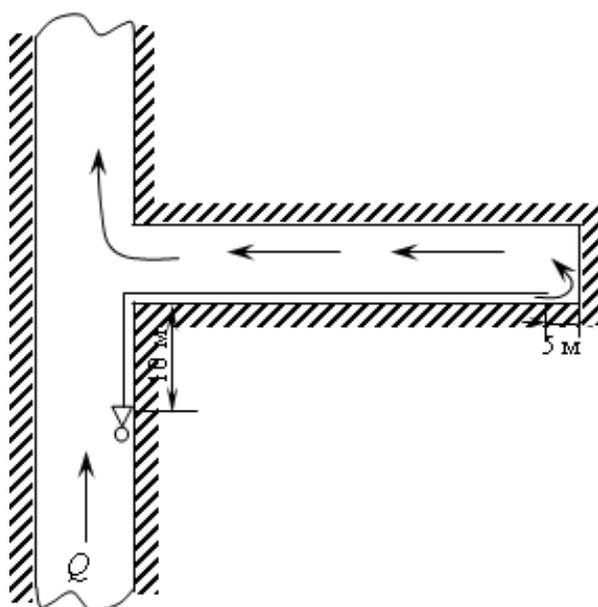


Рис. 6.9. Схема проветривания тупиковых выработок гибким трубопроводом

Достоинством нагнетательного метода проветривания является то, что в призабойное пространство подается чистый воздух. В дальнейшем по мере продвижения воздуха от забоя к устью выработки он постепенно обогащается метаном и другими газами, включая пыль, и вливается в основной поток воздуха, движущегося по главной выработке. Для исключения рециркуляции отработанного воздуха и его повторного поступления в проводимую выработку вентилятор местного проветривания необходимо устанавливать не ближе 10 м от сопряжения. При этом подача вентилятора должна быть не более 70 % расхода воздуха, движущегося по сквозной выработке.

Возможно также для проветривания тупиковой выработки использование жесткого трубопровода (рис. 6.10). Достоинство такого метода в том, что загрязненный воздух отводится из призабойной зоны изолированно по трубопроводу, а свежий воздух поступает к забою по выработке, где могут находиться люди. Эффективность проветривания выработки зависит от расстояния между концом всасывающего трубопровода и забоем: чем ближе трубопровод расположен к забою, тем быстрее проветривается выработка.

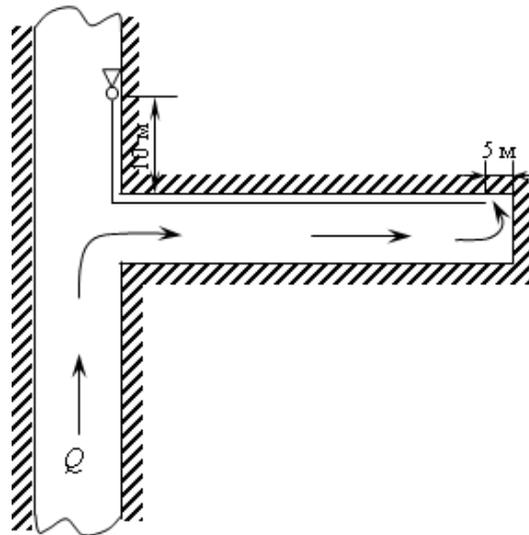


Рис. 6.10. Схема проветривания тупиковой выработки всасывающим способом с жестким трубопроводом

При проведении выработки спаренными забоями проветривание каждой из них может осуществляться двумя вентиляторами местного проветривания по схеме, представленной на рис. 6.11. В этом случае каждая предыдущая сбойка должна перекрываться перемычкой.

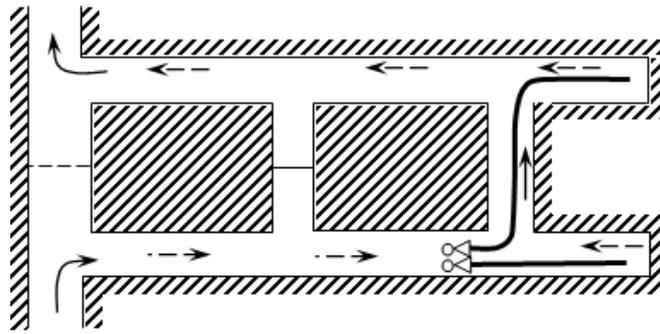


Рис. 6.11. Схемы проветривания выработок, проходимых спаренными забоями

Отдельно стоит вопрос проветривания вертикальных тупиковых выработок или шахтных стволов при их проходке. В этом случае призабойное пространство ограничено проходческим полком, что затрудняет удаление вредных газов после взрывания без дополнительной интенсификации этого процесса. Свежий воздух подается вентилятором, установленным на полке, а загрязненный удаляется с помощью вентилятора на поверхности (рис. 6.12), при этом вентилятор, установленный на полке выполняет вспомогательную роль, перемешивая воздух и содержащиеся в нем примеси в пространстве между полком и забоем, а всасывающий вентилятор в устье ствола, имея большую производительность, осуществляет отсос загрязненного воздуха на поверхность. Достоинство этого способа заключается в том, что выработка проветривается быстро и постоянно заполнена свежим воздухом.

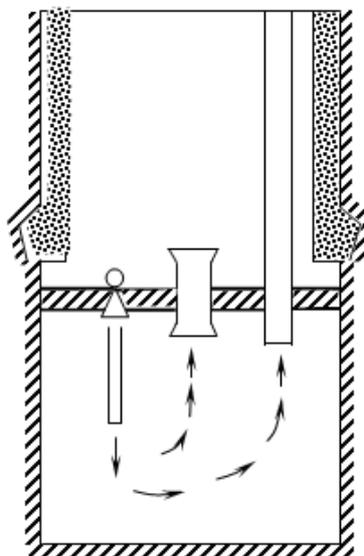


Рис. 6.12. Комбинированное проветривание при проходке шахтного ствола

### ***6.5. Схемы вентиляции при разработке угольных пластов, склонных к самовозгоранию***

Как отмечалось ранее, угольные пласты, склонные к самовозгоранию, способны окисляться при условии притока свежего воздуха, обогащенного кислородом, если масса угольного скопления достигла критической величины. Учитывая, что при разработке угольных пластов любыми системами остаются большие потери угля, уходящие в завал, можно предполагать, что условия для развития эндогенного пожара будут практически всегда.

В связи с этим при проектировании технологических параметров систем разработки горючих ископаемых необходимо предусматривать максимальную полноту их извлечения, а схемы вентиляции выбирать таким образом, чтобы утечки воздуха не проходили через выработанное пространство или поддерживать разность давлений между выработанным пространством и поверхностью близкой к нулю. Достижение этого эффекта может быть обеспечено применением нагнетательно-всасывающего способа проветривания шахты или нагнетательного способа проветривания при разработке верхних горизонтов. Применение фланговой схемы проветривания способствует формированию меньших утечек воздуха через выработанное пространство при прямоочном движении воздуха по конвейерным и вентиляционным выработкам выемочного участка, что также снижает вероятность возникновения пожара.

Наиболее неблагоприятной в этом отношении является центральная схема проветривания, поскольку создает большую депрессию в выработанном пространстве.

На разработку угольных пластов, склонных к самовозгоранию, накладываются также и другие ограничения технологического характера, к которым можно отнести бесцеликовую выемку угольных пластов, применение крепи из негорючих материалов, специальные режимы вентиляции при пожарах, пожарное водоснабжение и др. Все мероприятия по разработке угольных пластов, склонных к самовозгоранию, приведены в Правилах безопасности в угольных шахтах.

## Контрольные вопросы к главе 6

1. Способы и схемы вентиляции шахт.
2. Схемы вентиляции выемочных участков (варианты).
3. Вентиляция тупиковых выработок.
4. Что такое общешахтная депрессия?
5. Расчет общешахтной депрессии.
6. Какие приборы применяются при проведении депрессионных съемок?
7. Что характеризует депрессионная диаграмма?

## 7. УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ В ШАХТАХ

### *7.1. Газовый барьер и основные принципы управления метановыделением на выемочных участках*

При разработке высокогазоносных угольных пластов все более возрастает опасность не только внезапных выбросов угля и газа и подобных им газодинамических явлений, но и обычных выделений метана в действующие выработки, достигающих экстремальных значений, приводя в ряде случаев к взрывам метановоздушной смеси, угольной пыли и последующим пожарам. Подобные происшествия в последние годы в Кузбассе имели место на шахтах «Первомайская», «Зыряновская», «Комсомолец», «Тайжина», «Листвяжная», «Абашевская», «Распадская», в Воркуте на шахте «Центральная» и др. с катастрофическими последствиями и большим количеством несчастных случаев со смертельным исходом. Критерием безопасности ведения горных работ при интенсивной отработке угольных пластов является так называемый газовый барьер. Он ограничивает темпы подвигания забоев подготовительных выработок, их протяженность и интенсивность добычи угля в очистных забоях путем защитного отключения электрооборудования проходческих, добычных и транспортных машин при достижении концентрации метана в выработках критических значений с помощью датчиков аппаратуры автоматического контроля метана (АКМ, «Метан», «Микон-1» или им подобным). В результате эти очень дорогостоящие машины начинают работать с недогрузкой и значительными простоями. Отодвинуть газовый барьер традиционными схемами вентиляции, предусматривающими раз-

бавление метана свежим воздухом, в ряде случаев, особенно при высокой концентрации горных работ, нельзя из-за наличия верхних пределов допустимых скоростей вентиляционных потоков в действующих выработках (4 м/с – в забоях, 6 м/с – в прилегающих участковых выработках). Отодвинуть этот барьер можно только за счет уменьшения поступления метана в действующие выработки из разрабатываемого пласта, его спутников и вмещающих пород, для чего требуется проведение ряда мероприятий по управлению газо-выделением на выемочных участках.

Управление метановыделением осуществляется выполнением следующих взаимно дополняющих друг друга технологических процессов:

- расчет и подача в горные выработки количества воздуха, обеспечивающего концентрацию метана не более 1 %;

- перераспределение воздушных потоков в пределах выемочных участков таким образом, чтобы в очистной и подготовительный забои поступала свежая струя;

- снижение метановыделения из выработанного пространства, из подрабатываемых пластов-спутников из разрабатываемого пласта средствами дегазации;

- снижение метановыделения из отбитого угля в очистном и подготовительном забоях при высокопроизводительной отработке угольных пластов путем управления режимом работы выемочных и транспортных машин (конвейеров), обеспечивающим поддержание концентрации метана на исходящей струе менее 1 %;

- рациональным планированием порядка отработки пластов в свите или слоев в пласте (при слоевой разработке), обеспечивающим более равномерное распределение метановыделения в выработки разрабатываемого пласта. Рассмотрим эти мероприятия более подробно.

## ***7.2. Способы управления метановыделением средствами вентиляции***

Основной задачей системы вентиляции шахты является обеспечение расчетным количеством воздуха каждого забоя и каждой выработки в зависимости от их абсолютной метанообильности. Вентиляция шахт является наиболее традиционным методом управления газовой выделением, однако с ростом газообильности шахт

данный метод исчерпал свои возможности, поскольку требует постоянного увеличения сечения горных выработок и производительности вентиляторов главного проветривания.

В сложившихся условиях возникает необходимость управления метановыделением в пределах выемочных участков шахт путем изменения традиционных схем проветривания очистного забоя, использованием газоотсасывающих вентиляторов, газодренажных выработок, камер смешения, отдельного проветривания очистного забоя и примыкающего к нему конвейерного штрека и др. В условиях пологого падения угольных пластов, характерного для центральных районов Кузбасса, реализуется, как правило, нисходящее проветривание очистных забоев с выходом исходящей вентиляционной струи на фланговый уклон, куда также будет поступать и вентиляционная струя с конвейерного штрека, содержащая метан, выделившийся из транспортируемого из лавы отбитого угля.

Некоторое время на шахтах Кузбасса применялся метод изолированного отвода высококонцентрированных метановоздушных смесей через выработанное пространство в газосборную выработку в фланговый газосборный уклон и далее без разбавления через вентиляционную скважину на земную поверхность с помощью газоотсасывающего вентилятора ВМЦГ, просасывающего через себя любую, в том числе и взрывоопасную концентрацию метана (5–15 %). При этом создается аэродинамическая изоляция атмосферы лавы, конвейерного и вентиляционного штреков от выработанного пространства.

На рисунке 7.1 изображена схема управления метановыделением с использованием камеры смешения, на рис. 7.2 – камера смешения, а на рис. 7.3 – схема управления метановыделением с использованием вентиляционной скважины и газоотсасывающего вентилятора.

Плотный отшив изготавливается из досок и сверху покрывается для герметичности старыми вентиляционными трубами. Регулирующая заслонка приводится в действие с помощью тяги. Ее назначение – обеспечить на выходе из камеры смешения воздушный поток в уклоне с содержанием метана не более 1 % (рис. 7.1).

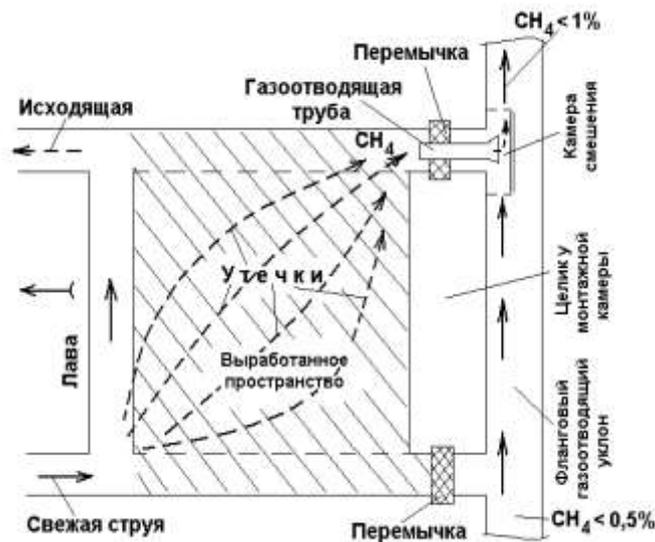


Рис. 7.1. Схема управления метановыделением с использованием камеры смешения



Рис. 7.2. Камера смешения

Если свежую струю принять за 100 %, то исходящие I и II составляют примерно по 50 % расхода воздуха. Исходящая I должна обеспечивать проветривание потока угля, движущегося по конвейеру из лавы. При большом числе подрабатываемых угольных пластов-спутников в исходящей II может быть и более 50 % расхода воздуха. Если угол падения пласта более  $10^\circ$ , то в лаве принимают

восходящее проветривание и выпуск утечек воздуха с высокой концентрацией метана осуществляют через решетку с дверью на вентиляционном штреке, а внизу на конвейерном штреке возводят глухую перемычку. При большом (более 1000 м) отходе лавы от монтажной камеры следует пробурить вторую вентиляционную скважину в выработанное пространство ближе к забою. Схема 7.3 может работать в режиме добычи кондиционного газа (содержание метана на выходе из ВМЦГ 30 % и более).



Рис. 7.3. Схема управления метановыделением с использованием вентиляционной скважины и газоотсасывающего вентилятора

### ***7.3. Способы и схемы управления метановыделением средствами дегазации***

Второй технологический процесс – изолированный отвод метана, минуя атмосферу действующих выработок, на земную поверхность с помощью средств дегазации – по дегазационным скважинам, дегазационному газопроводу под вакуумом, создаваемом вакуум-насосами передвижной или стационарной дегазационной установкой.

Дегазационные скважины можно бурить:

а) с земной поверхности до разрабатываемого пласта с последующим подключением к дегазационному газопроводу, когда к ним приблизится забой лавы и когда они смогут откачивать метановоздушную смесь из выработанного пространства (дегазация вы-

работанного пространства в зонах беспорядочного и крупноблочного обрушения пород);

б) с земной поверхности до вышележащих пластов-спутников на удалении около 15 вынимаемых мощностей от почвы разрабатываемого пласта (дегазация подрабатываемых пластов-спутников в зоне трещинообразования, т. е. выше зоны обрушения);

в) по одиночному пласту, разрабатываемому первым, по восстанию или по падению, не разгруженному от горного давления. Для ускорения дегазации можно осуществлять гидроразрыв пласта через восстающие скважины. Под напором до 25 МПа в пласт закачивается 60–80 м<sup>3</sup> воды через скважину, загерметизированную на длину 40–50 м, в которой оставлена на конце фильтрующая часть длиной 1–2 м; затем скважина открывается, из нее интенсивно изливается вода и образующиеся в пласте трещины гидроразрыва становятся газопроводящими с последующим бурением через создавшуюся сеть трещин дегазационных скважин;

г) по пластам после опережающей защитной надработки (дегазация разгруженных пластов).

Выработка, из которой впоследствии будут буриться восстающие или нисходящие пластовые дегазационные скважины с недобуром до верхнего штрека на 10 м (чтобы не было подсосов воздуха) и с перебуром контура нижней выработки до ее проходки и лавы одновременно), проводится под защитой веера разведочно-дегазационных скважин за контуром выработки. Их еще называют барьерными, т. к. они перехватывают потоки метана как впереди, так и позади забоя, стремящиеся из глубины пласта в выработку за счет разгрузки и перепада газового давления. Скважины бурят из боковых ниш, нарезаемых проходческим комбайном в шахматном порядке таким образом, чтобы скважины дегазировали пласт в контуре и на 4 м за контур выработки с обеих сторон при неснижаемом опережении дегазированной зоной забоя выработки 5 м.

Дегазационные скважины с земной поверхности бурят диаметром 100–150 мм. Приустьевая часть скважины герметизируется введением составной стальной трубы и заполнением затрубного пространства высокорасширяющимся цементно-песчаным раствором с расширяющей добавкой порошка алюминия и смачивателя (коэффициент расширения такого раствора 1,2–1,25).

На рисунке 7.4 изображена совмещенная схема дегазации выработанного пространства и подрабатываемых пластов-спутников скважинами с земной поверхности.

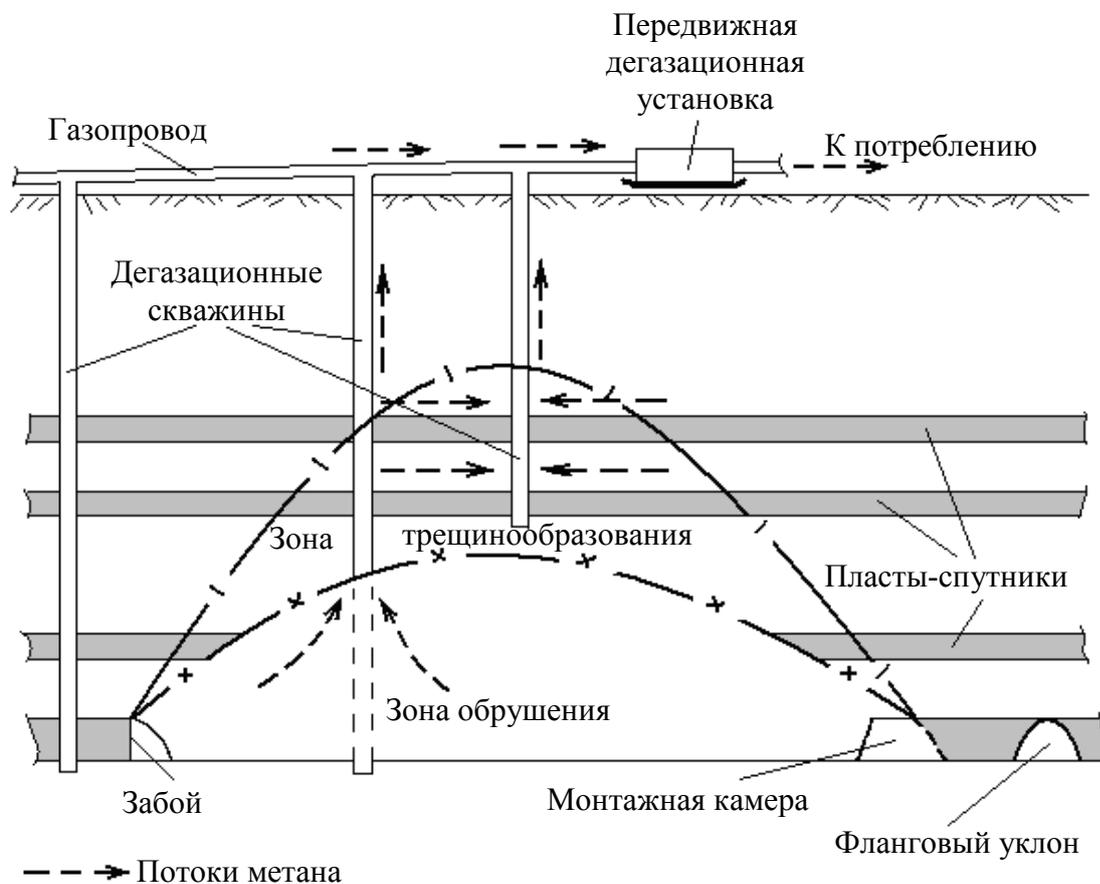


Рис. 7.4. Совмещенная схема дегазации выработанного пространства в зоне обрушения и подрабатываемых пластов-спутников в зоне трещинообразования скважинами с земной поверхности

На рисунке 7.5 приведена схема дегазации разрабатываемого пласта без разгрузки от горного давления, а на рис. 7.6 и 7.7 показаны две схемы дегазации пластов после их наработки (первая – пластовыми восстающими скважинами из конвейерного или откаточного штрека, вторая – породными скважинами из полевого штрека).

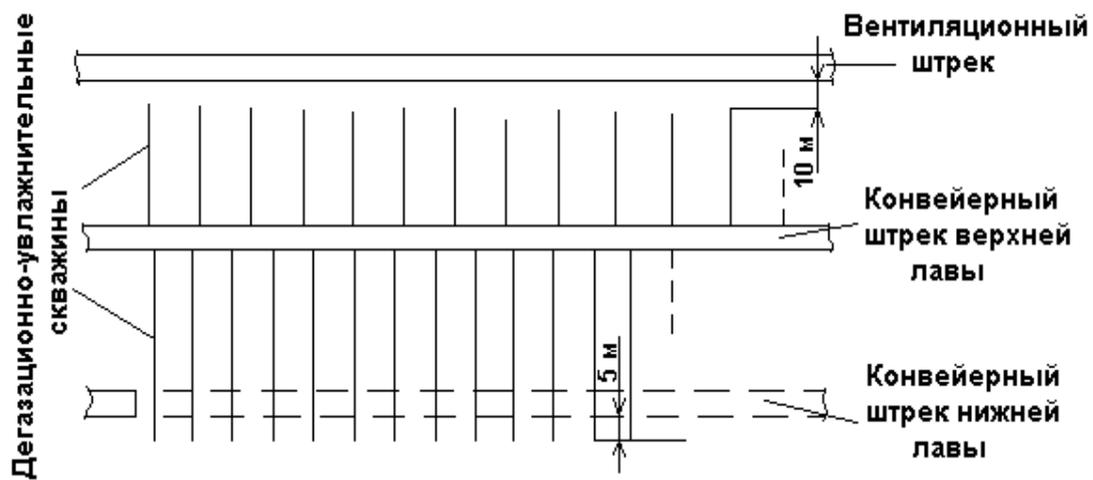


Рис. 7.5. Схема дегазации (увлажнения) неразгруженного разрабатываемого пласта восстающими и нисходящими пластовыми скважинами

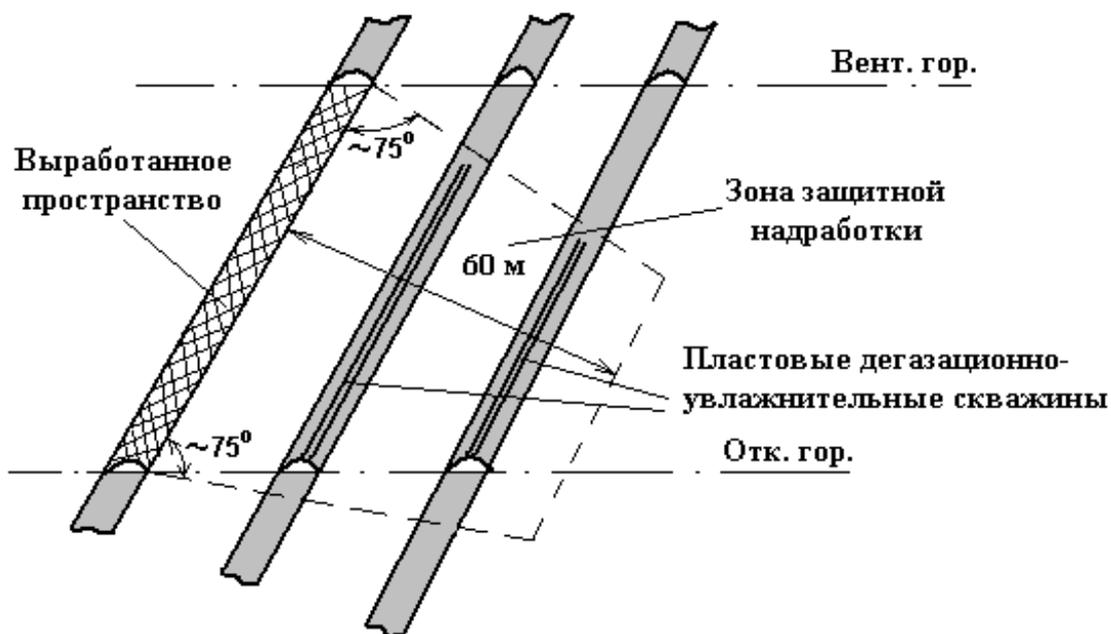


Рис. 7.6. Схема дегазации (и увлажнения) пластов после наработки пластовыми восстающими скважинами

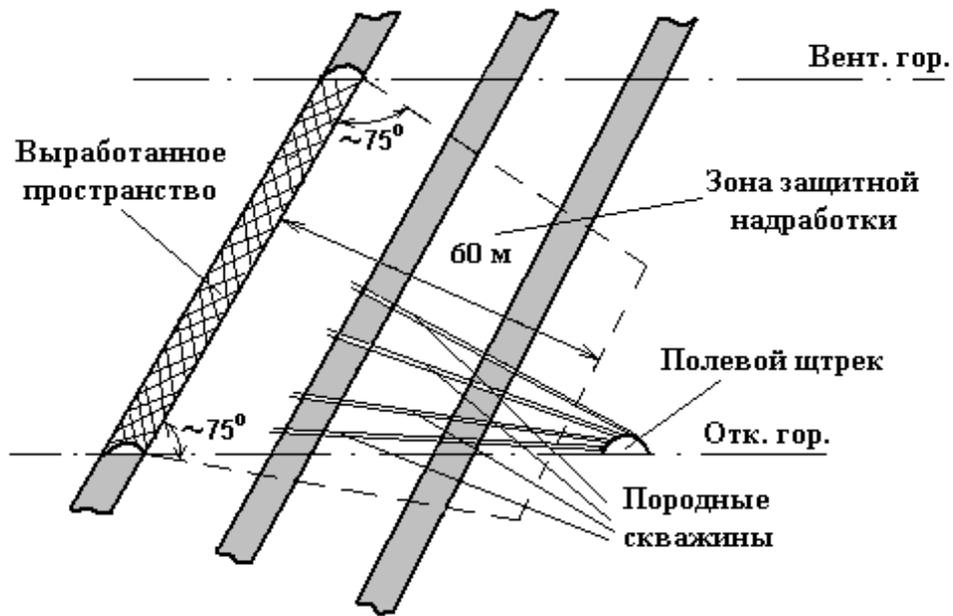


Рис. 7.7. Схема дегазации пластов после надработки породными скважинами с полевого штрека

Схема дегазации, изображенная на рис. 7.8, дает представление о дегазации ограждающими (барьерными) скважинами пласта для снижения метанообильности подготовительной выработки при ее проходке.

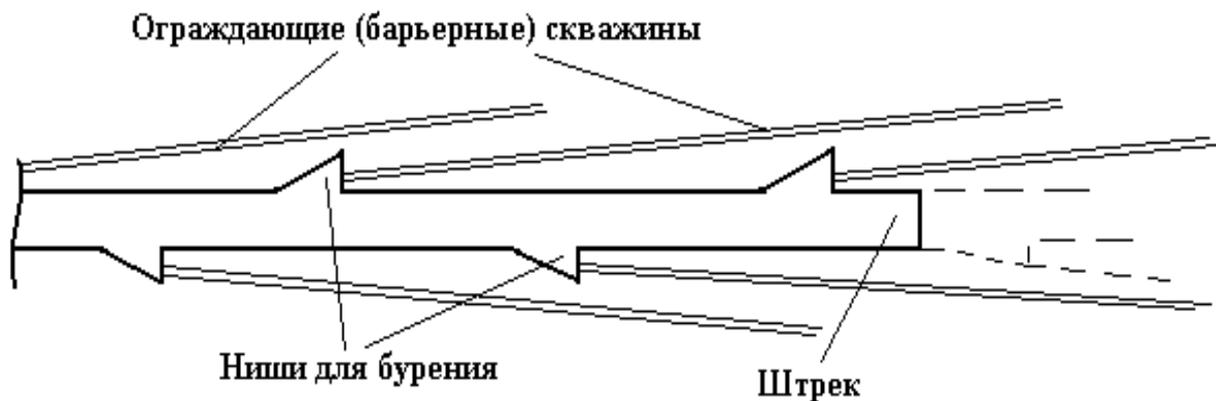


Рис. 7.8. Схема проходки подготовительной выработки с бурением ограждающих (барьерных) скважин

#### ***7.4. Способы и схемы управления метановыделением путем увлажнения пластов***

Третий технологический процесс – блокирование метана в угольных порах капиллярным давлением воды и пережимом фильтрующих трещин за счет набухания угля при низконапорном (под давлением меньше веса вышележащих пород) увлажнении пластов. Такое увлажнение целесообразно производить через отработавшие дегазационные скважины, кроме скважин с земной поверхностью и барьерных скважин. Если предварительная дегазация пластов не предусматривается, то диаметр увлажненных скважин можно уменьшить до 45–60 мм, а трудоемкую цементно-песчаную герметизацию скважин можно заменить на герметизацию рукавными гидрозатворами, автоматически разжимающимися в скважине под напором нагнетаемой воды. Средствами увлажнения пластов являются увлажнительные скважины, противопожарно-оросительный водопровод, насосные установки с автоматически регулируемым напором и расходом воды в зависимости от приемистости пласта (чтобы не разорвать пласт преждевременно, когда еще не обеспечена норма подачи воды 20–40 л на 1 т запасов угля).

#### ***7.5. Управление газовой выделением путем изменения порядка выемки слоев в мощном пласте или пластов в свите***

Дегазация угольных пластов может осуществляться не только путем бурения скважин по различным геометрическим схемам и специальными методами воздействия на угольный пласт, но и естественным образом при ведении очистных работ. При проведении подготовительных выработок для оконтуривания выемочных блоков либо монтажных камер, диагональных печей и т. д. создаются условия для выхода газа из угольного массива через поверхности обнажения. При подработке или надработке пласта эти процессы многократно усиливаются, в результате чего его природная газоносность существенно снижается.

Это явление может быть использовано при проектировании технологических схем отработки пластов в разных горно-геологических условиях с целью достижения максимального эффекта их естественной дегазации или более благоприятного рас-

пределения газовыделения во времени на весь период отработки данного пласта.

Как показала практика, эффективность предварительной дегазации зависит от того, какой выбран порядок выемки слоев в мощном пласте – восходящий или нисходящий, а также направление выемки слоя – по восстанию, по падению или простиранию.

Все вышеперечисленные факторы характеризуют процесс естественной газоотдачи угольных пластов и широко используются при решении практических задач по снижению их газоносности и выбросоопасности, а также общей газообильности выемочных участков. Положительным моментом метода естественной дегазации является отсутствие дегазационных коммуникаций, оборудования, вакуум-насосной станции и обслуживающего их персонала, а также высокая эффективность, обеспечивающая снижение абсолютной газообильности выемочных участков до шести раз по сравнению с недегазационными зонами угольных пластов. При этом большое значение имеет выбор очередности и порядка отработки пластов в свите или слоев в пласте (при большой мощности), способа управления кровлей, схемы проветривания участка и др.

Очередность отработки слоев в мощных угольных пластах пологого падения Кузбасса представлена на рис. 7.9.

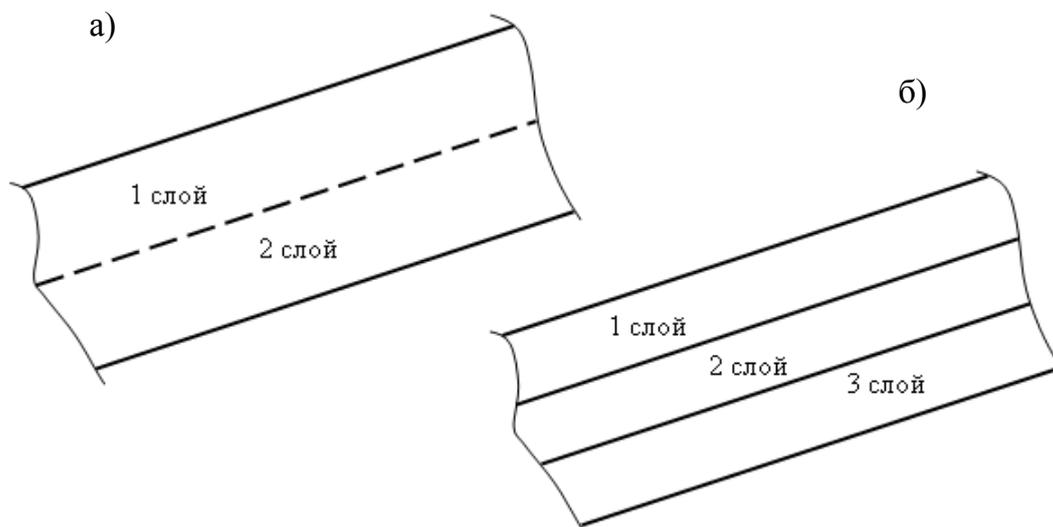


Рис. 7.9. Очередность отработки мощного пологого пласта с разделением на слои в нисходящем порядке: а – два слоя; б – три слоя.

Выемка ведется по простиранию системой длинных столбов с обрушением кровли (Томусинский район)

В условиях крутого падения и большой мощности пластов Прокопьевско-Киселевского района Кузбасса, достигающих 20 м и

более и обрабатываемых с закладкой выработанного пространства, вариантов слоевой выемки значительно больше (рис. 7.10).

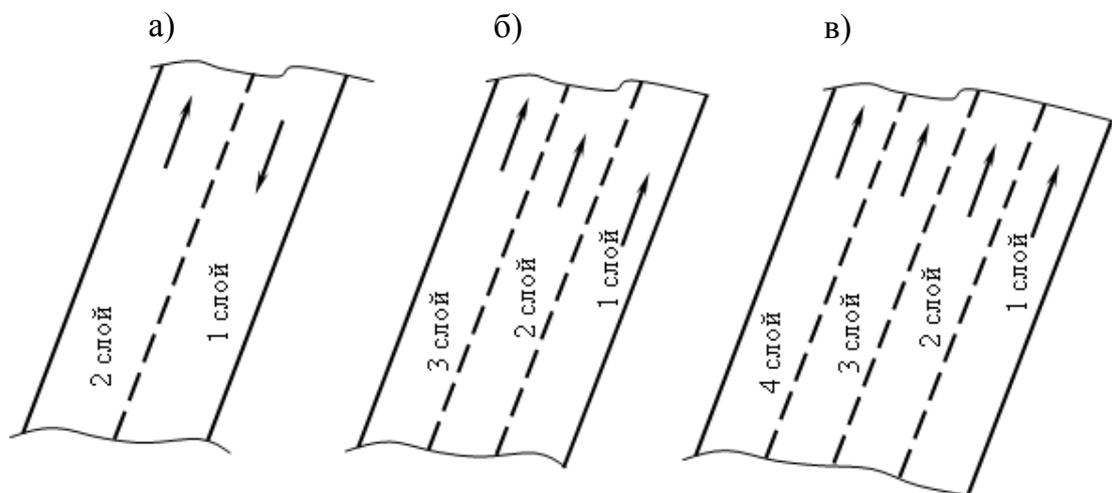


Рис. 7.10. Очередность и направление отработки слоев в мощных пластах крутого падения с закладкой выработанного пространства:  
а – два слоя; б – три слоя; в – четыре слоя

При любом варианте слоевой отработки мощного пласта в наиболее неблагоприятном положении по газу является первый слой независимо от его положения по мощности пласта. К недостаткам метода естественной дегазации следует отнести то, что значительная часть метана, десорбированного из коллекторов, поступает в выработки разрабатываемого пласта, а это приводит к необходимости увеличения количества воздуха для их проветривания, повышения мощностей вентиляторов и их производительности, увеличения сечения воздухоподающих выработок. Кроме того, весь газ, поступивший в участковые выработки, выбрасывается в атмосферу, создавая предпосылки к негативным эффектам в атмосфере Земли.

Оценивая полученные результаты, можно заключить, что значительная газоотдача временно невынимаемых толщ мощных угольных пластов, особенно при их подработке, с одной стороны, обеспечивает эффективную естественную дегазацию массива, с другой – приводит к резкому увеличению газообильности первого слоя, создавая тем самым диспропорции газового баланса по слоям.

В этом плане наиболее рациональным было бы достижение равномерного распределения дебита метана между слоями, что исключило бы полностью лимитирующее влияние газового фактора на производительность очистных забоев.

## **7.6. О возможности и целесообразности добычи метана из угольных месторождений Кузбасса**

По приближенным геологическим оценкам о запасах угля и газоносности угольных пластов и вмещающих пород в недрах Кузбасса до глубины 1500 м накоплены колоссальные объемы так называемого «шахтного метана» – около 25 трлн м<sup>3</sup>, что составляет более 40 % разведанных запасов углеводородных природных газов России и ближайшего зарубежья. По теплотворной способности этот никогда не учитываемый в топливном балансе метан с небольшой примесью высших углеводородов эквивалентен 30 млрд т каменного угля. И если бы удалось извлечь хотя бы половину запасов метана, то это бы соответствовало многолетней добыче угля всеми шахтами и разрезами Кузнецкого бассейна. Это основные, далеко не исчерпывающие доводы в пользу развития метановой энергетики при сокращении добычи угля, особенно экологически ущербным открытым способом.

В практике передовых угледобывающих стран с целью промышленной добычи метана из угольных пластов применяется бурение скважин с земной поверхности. Для активизации выхода метана из угольного массива применяется технология направленного турбобурения длинных скважин, включая бурение по вертикали до пласта с разворотом в плоскости пласта, а также гидроразрыв угольного пласта. Подобная технология стала применяться и в Кузбассе.

С глубиной давление газа в угольном массиве нарастает по гидростатическому закону начиная от границы зоны газового выветривания (рис. 7.11, а). Соответственно возрастают по параболическому закону запасы метана в угольном пласте (рис. 7.11, б). Однако с глубиной резко снижается газопроницаемость пласта (рис. 7.11, в), так как уменьшается зияние фильтрующих трещин в пласте вследствие их пережатия горным давлением, которое с глубиной растет по гидростатическому закону (рис. 7.11, г):

$$P = 0,01(H - H_0); \quad (7.1)$$

$$P_{гд} = \gamma H, \quad (7.2)$$

где  $\gamma$  – плотность вышележащих пород.

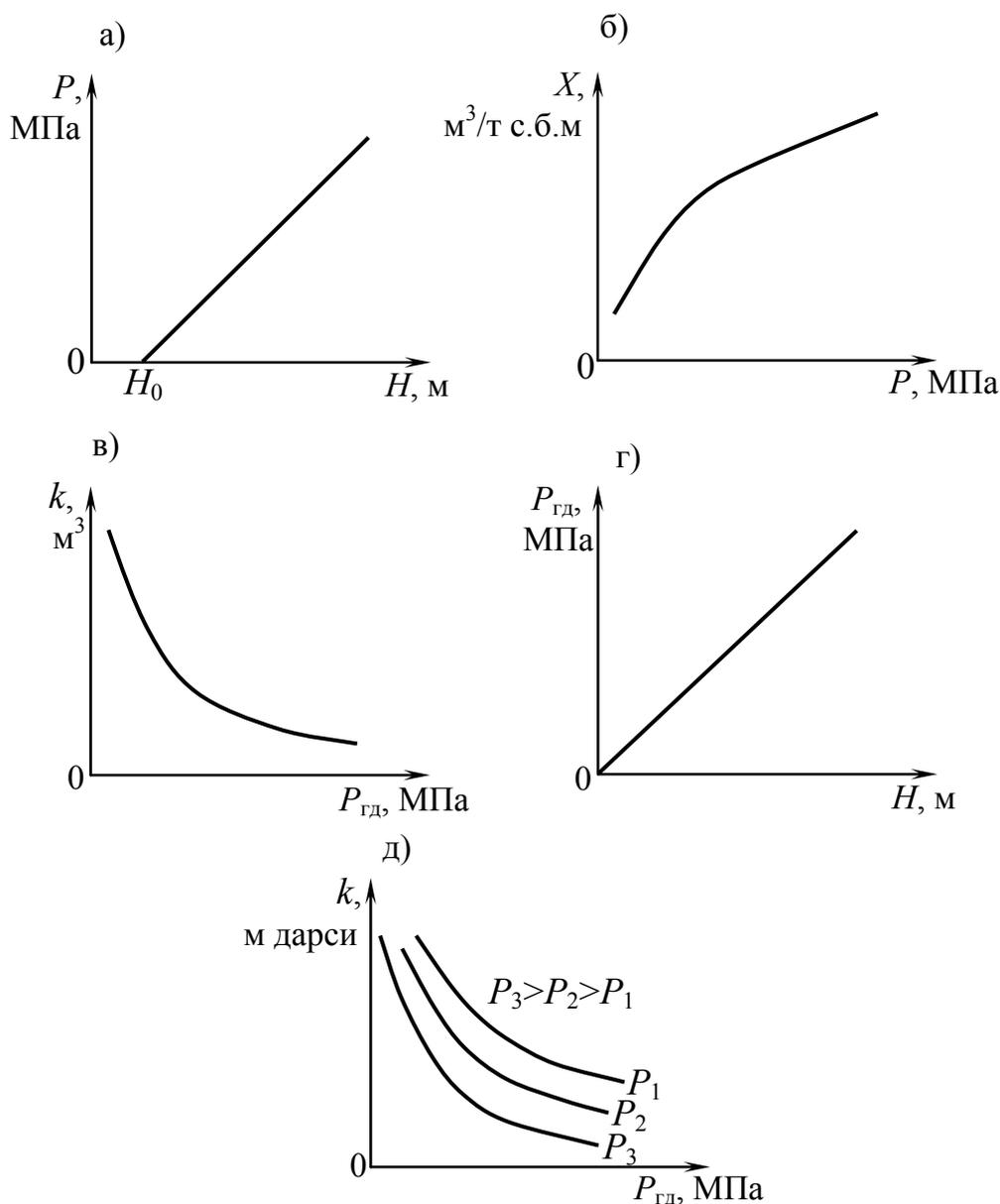


Рис. 7.11. Взаимосвязь давления газа  $P$ , газоносности  $x$ , газопроницаемости  $k$ , горного давления  $P_{гд}$  и глубины от земной поверхности  $H$  для угольных пластов

Уменьшению газопроницаемости угольного пласта на больших глубинах способствует не только нарастающее горное давление, но и так называемое набухание угля при газонасыщении, эффект которого обнаружили и оценили качественно за рубежом, а затем и количественно в России. Проникая в тонкую структуру угля между плоскими макромолекулами угля и мицеллами, метан раздвигает их и стремится увеличить объем угля. Но пласт сверху и снизу зажат породами и поэтому ему ничего не остается, как «деформироваться вовнутрь», т. е. смыкать еще больше плоские тре-

щины, являющиеся основными каналами фильтрации метана в скважину. В результате на больших глубинах метан сам себя блокирует в угле (в угольных порах и в более мелких микроколлекторах). И чем выше давление газа  $P$ , тем существеннее эффект такого блокирования. Это подтверждают лабораторные эксперименты по изучению газопроницаемости образцов угля, предварительно насыщенных метаном под различным давлением  $P$  в условиях, имитирующих различную глубину залегания пласта, а также шахтные исследования дегазации неразгруженных пластов на различных глубинах.

При дегазации скважинами выбросоопасных пластов, неразгруженных надработкой и подработкой очистными работами, был получен очень низкий эффект. Чтобы дегазацией снизить давление газа до невыбросоопасного значения  $P_H \leq 0,6$  МПа (или уменьшить газоносность пласта до величины  $x \leq 12$  м<sup>3</sup>/т) через скважины на расстоянии 6–20 м при глубине 420 м, потребовалось в Прокопьевском месторождении около 0,7 года, а в Воркутинском месторождении на глубинах 600–1000 м при бурении скважин через 4–6 м – 9 лет.

В современных условиях такие сроки абсолютно неприемлемы и единственным технически возможным способом решения данной проблемы является дегазация угольных пластов с разгрузкой от горного давления путем их надработки и подработки очистными работами. После упругого восстановления ранее сжатого горным давлением массива образуются зоны обрушения и прилегающие к ним сверху и снизу зоны трещинообразования, в которые заблаговременно следует пробурить дегазационные скважины, как из подземных выработок, так и с земной поверхности, или использовать для добычи метана вентиляционные скважины с газоотсасывающими вентиляторами. В этом случае потоки метана, поступающие из надрабатываемых и подрабатываемых пластов, будут просасываться через обрушенные породы выработанного пространства изолированно, минуя атмосферу действующих горных выработок.

## Контрольные вопросы к главе 7

1. Что такое газовый барьер?
2. Способы управления газовыделением средствами вентиляции.
3. Способы управления газовыделением средствами дегазации.
4. Управление газовыделением путем изменения схем проветривания выемочных участков.
5. Управление газовыделением путем предварительного увлажнения пластов.
6. Управление газовыделением путем изменения параметров технологического цикла выемки угля в очистном забое.
7. Влияние порядка отработки пластов в свите или слоя в мощном пласте на газообильность очистного забоя.

## 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ

### *8.1. Выбор способа вентиляции шахты*

Решение вопросов вентиляции шахты осуществляется, как правило, на стадии проектирования. Первоначально делается выбор способа и схемы вентиляции, что зависит от горно-геологических условий, проектной мощности шахты, глубины разработки, размера шахтного поля и других факторов.

Способ вентиляции определяет давление в горных выработках по отношению к давлению на поверхности, разность которых влияет на величину и направление утечек воздуха через выработанное пространство в ту или иную сторону. Этот фактор важен при разработке угольных пластов, склонных к самовозгоранию, так как именно утечки воздуха через выработанное пространство, где всегда остается много потерь угля, превышающих его критическую массу, необходимую для самовозгорания, создают условия для его первоначального окисления, переходящего в горение. В связи с этим при проектировании шахт всегда проводится предварительный лабораторный анализ угля из каждого угольного пласта в свите на склонность к самовозгоранию. На шахтах, разрабатывающих пласты, склонные к самовозгоранию, предпочтительным является нагнетательный способ проветривания, так как в этом случае про-

дукты горения будут направлены вместе с утечками воздуха на поверхность, а не в горные выработки шахты. Одновременно это также снизит и поступление метана из завала в очистной забой, что тоже положительно скажется на аэрологической ситуации в шахте.

На негазовых шахтах и шахтах, разрабатывающих угольные пласты, не склонные к самовозгоранию, особенно на больших глубинах возможно использование всасывающего способа проветривания, что может быть эффективным при нескольких вентиляторах, установленных на флангах.

Нагнетательно-всасывающий способ проветривания следует выбирать в тех случаях, когда в районе очистных забоев шахт желательно поддерживать минимальную депрессию, чтобы разность давлений между поверхностью и очистным забоем была близкой к нулю.

## ***8.2. Выбор схемы вентиляции шахты***

При выборе схемы вентиляции шахты необходимо учитывать следующие факторы: размер шахтного поля, аэродинамическое сопротивление самого дальнего маршрута в вентиляционной сети шахты, максимальную пропускную способность горных выработок по воздуху, максимальное использование для проветривания выработок общешахтной депрессии, обособленную вентиляцию очистных забоев свежей струей воздуха, возможность оперативного реверсирования струй в случаях аварий и др.

В современных шахтах Кузбасса и других бассейнов страны наиболее эффективными являются фланговые схемы проветривания при вскрытии наклонными стволами через фланговые шурфы, что позволяет иметь минимальное число горных выработок при одном, реже двух очистных забоях.

В пределах очистных участков шахт, где работают высокопроизводительные выемочные комплексы, схема проветривания является важнейшим элементом управления газовыделением, обеспечивающим нормальную аэрогазовую ситуацию в шахтной атмосфере. При этой схеме существует возможность подачи свежей струи воздуха в очистной забой по выработкам, свободным от поступления вредных примесей, в частности, через вентиляционный штрек. При углах падения пласта менее  $10^\circ$  свежая струя, поступая в лаву из вентиляционного штрека, спускается к конвейерному,

по которому тоже идет воздух по направлению к лаве и, сливаясь в общий поток, поступает на фланговую выработку, выходящую на шурф. По такой схеме возможно проветривание как однокрылой, так и двукрылой панели.

В прошлом на шахтах широко применялась центрально-сдвоенная схема проветривания с расположением воздухоподающего и воздуховыдающего стволов в центре шахтного поля, однако сейчас такие схемы практически не применяются и представляют скорее исторический интерес.

### ***8.3. Прогноз газообильности шахт***

Прогноз газообильности шахты является важнейшим моментом при проектировании вентиляции строящегося горного предприятия, так как по этому показателю определяются способ и схема проветривания, а также выбирается главный вентилятор. Прогноз газообильности шахты, осуществляемый на стадии проектирования, требует большого количества исходных данных, получаемых в процессе предварительной разведки месторождения, включая строение угольных пластов, их мощность, угол падения, природную газоносность, наличие смежных пластов, мощность междупластья и др.

В действующем в настоящее время Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт 1989 года даются рекомендации по расчету газовыделения из каждого источника, который может теоретически участвовать в формировании общего газового баланса шахты. Многие расчетные формулы, приведенные в Руководстве, являются эмпирическими, ориентированными на определенные угольные бассейны бывшего СССР, предполагают большое количество лав, шахтопластов и горизонтов на одной шахте, чего нет в современных шахтах, в связи с чем в данном учебном пособии принято решение не помещать его полное изложение, а ограничиться лишь некоторыми принципиальными положениями, не утратившими актуальность на сегодняшний день.

В частности, особенностью проектирования вентиляции в современных шахтах является то, что в них работают, как правило, одна, редко две лавы, оснащенные высокопроизводительными механизированными комплексами известных мировых фирм горного машиностроения, что позволяет обеспечивать суточную произво-

дительность по добыче угля до 40 тыс. тонн и высокие темпы подвигания очистного забоя. Это, в свою очередь, делает неактуальной возможность поступления метана из смежных с разрабатываемым угольных пластов, так как на всех шахтах применяется нисходящий порядок отработки пластов, что исключает соответственно их подработку, а нижележащие пласты испытывают воздействие разгрузки в значительно меньшей степени и с большим отставанием от проекции линии очистного забоя, в результате чего газ практически не может через межпластовую толщу мигрировать в очистной забой рабочего пласта.

Кроме того, ввиду достаточно простой схемы горных выработок новых шахт других источников газовой выделения кроме очистного и подготовительных забоев, а также выработок, по которым транспортируется уголь, по большому счету нет. В связи с этим основными составляющими газового баланса шахты следует считать отбитый уголь в очистном и подготовительном забоях, в зависимости от его массы и времени пребывания, уголь, движущийся по конвейерной линии шахты, свежееобнаженную поверхность угольного пласта после прохода комбайна, интенсивность газовой выделения с которой пропорциональна скорости подвигания лавы. В некоторых случаях возможны и другие источники поступления метана в горные выработки, в частности, при наличии суфляров, прорывов газа из старых выработанных пространств или газовых коллекторов. Не исключается также газовой выделения из выработанного пространства, но только в тех случаях, когда угольный пласт разрабатывается с разделением на слои и временно невынимаемая толща примыкает вплотную к разрабатываемому слою или в завал уходят большие потери угля из очистного забоя ввиду неполного захвата мощности пласта исполнительным органом комбайна. Однако во всех упомянутых случаях наибольшая доля газового баланса выемочного участка принадлежит отбитому углю, общая масса которого может достигать 300–400 тонн в определенных фазах технологического цикла. С учетом этого прогноз газобильности очистного забоя должен производиться по максимальному дебиту метана, который определяется схемой работы комбайна и газоносностью призабойной зоны угольного пласта. Максимальный дебит метана в очистной забой будет соответственно при максимальной массе угля на лавном конвейере, когда комбайн находится в крайнем верхнем по-

ложении и конвейер полностью загружен углем. Газовыделение из отбитого угля в этом случае будет определяться по формуле

$$I = (X_0 - X_{\text{ост}})L m d \gamma, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8.1)$$

где  $X_0$  – газоносность пласта в краевой части,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $X_{\text{ост}}$  – остаточная газоносность отбитого угля на выходе из выемочного участка,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;  $L$  – длина лавы, м;  $m$  – вынимаемая мощность пласта, м;  $d$  – ширина захвата комбайна, м;  $\gamma$  – плотность угля в массиве,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Второй составляющей общего дебита газа в очистной забой является газовыделение из обнаженной поверхности угольного пласта сразу после прихода комбайна. При непрерывном цикле работы в лаве газоносность призабойной части пласта практически остается постоянной, что в свою очередь определяет постоянство газоотдачи его свежееобнаженной поверхности. Объем газа, выделяющегося с поверхности обнажения, можно определить по формуле

$$I = \frac{I_0}{at}, \quad (8.2)$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность газоотдачи с поверхности обнажения,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $t$  – время после обнажения, мин;  $a$  – коэффициент, характеризующий темп снижения газовыделения во времени (определяется опытным путем).

Учитывая, что один проход комбайна вдоль лавы при ее средней длине 250–300 м занимает 25–30 минут, время обнажения разных отрезков поверхности очистного забоя будет изменяться также от 0 до 30 минут, что при строгом подходе к прогнозу газообильности необходимо было бы учитывать в расчетах. Однако в практическом плане вполне допустимо принять среднее время обнажения на всей длине лавы, что существенно не скажется на конечном результате. Для проверки наличия или отсутствия газовыделения из выработанного пространства необходимо провести поперечную газовую съемку в очистном забое в нескольких сечениях, однако это возможно только для действующих шахт.

По аналогии с очистным забоем рассчитывается газовыделение в подготовительный забой, находящийся в проходке, с учетом

производительности комбайна, объема горной массы, отторгаемой в единицу времени, и газоносности пласта в призабойной части.

Все остальные горные выработки, пройденные ранее, не являются активными источниками газовыделения и могут учитываться в расчете общей газообильности шахты коэффициентом 1,1–1,15.

С учетом изложенного общая газообильность проектируемой шахты может вычисляться по формуле

$$I_{\text{ш}} = 1,1 \cdot (\sum I_{\text{оч}} + \sum I_{\text{пр}} + \sum I_{\text{вп}} + \sum I_{\text{под.в}} + \sum I_{\text{д}}), \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8.3)$$

где  $\sum I_{\text{оч}}$  – сумма газообильности очистных забоев,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $\sum I_{\text{пр}}$  – сумма газообильности выработок, находящихся в проходке,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $\sum I_{\text{вп}}$  – суммарное газовыделение из выработанных пространств,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $\sum I_{\text{под.в}}$  – суммарная газообильность поддерживаемых выработок,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $\sum I_{\text{д}}$  – суммарное газовыделение из дополнительных источников,  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

В заключение следует отметить, что все рассуждения, приведенные выше, относятся в основном к проектируемым шахтам, в связи с чем носят ориентировочный характер и требуют уточнений в последующем. Для действующих шахт газообильность очистных и подготовительных забоев с достаточно высокой точностью может определяться опытным путем непосредственно на конкретном объекте либо по аналогичным объектам на данном пласте. При этом предпочтение следует отдавать не относительной, а абсолютной газообильности как наиболее объективному показателю.

#### ***8.4. Расчет количества воздуха для проветривания шахт***

Главной целью воздуха, подаваемого в шахту, является поддержание концентрации метана в атмосфере не более 1 %, а также обеспечение нормальной жизнедеятельности персонала в процессе труда. Каждый источник метана требует стократного превышения количества подаваемого воздуха по отношению к объему газовыделения, а потребление кислорода людьми, работающими в шахте, не менее 6  $\text{м}^3/\text{мин}$  на каждого человека. Следовательно, эти два критерия являются главными при проектировании вентиляции шахт.

Исходя из требований Правил безопасности в угольных шахтах, количество воздуха по метану рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{100 I K_H}{C - C_0}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8.4)$$

где  $I$  – абсолютная газообильность очистного или подготовительного забоя,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $K_H$  – коэффициент неравномерности газовыделения в выработку;  $C$  – допустимая концентрация метана на исходящей струе очистного или подготовительного забоя, %;  $C_0$  – допустимая концентрация метана во входящей струе, %.

Количество воздуха, необходимое для обеспечения дыхания людей, рассчитывается исходя из норматива на одного работающего ( $6 \text{ м}^3/\text{мин}$ ) по формуле

$$Q = 6n, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8.5)$$

где  $n$  – максимальное число работающих в смене.

При активном ведении взрывных работ количество воздуха может рассчитываться по газам, выделяющимся при взрывании:

$$Q = \frac{34}{T} \sqrt{BV_{\text{оч}}}, \quad (8.6)$$

где  $T$  – время проветривания после взрыва, мин;  $B$  – масса взрываемого ВВ, кг;  $V_{\text{оч}}$  – объем очистного забоя,  $\text{м}^3$ .

Из всех полученных значений количества воздуха принимается максимальное.

В целом по шахте расход воздуха определяется по формуле

$$Q = 1,1(\sum Q_{\text{уч}} + \sum Q_{\text{п.в}} + \sum Q_{\text{под.в}} + \sum Q_{\text{к}} + \sum Q_{\text{ут}}), \quad (8.7)$$

где  $\sum Q_{\text{уч}}$  – расход воздуха для проветривания выемочных участков;  $\sum Q_{\text{п.в}}$  – расход воздуха для проветривания подготовительных выработок;  $\sum Q_{\text{под.в}}$  – расход воздуха для проветривания поддерживаемых выработок (вентиляционные и конвейерные штреки, уклоны, бремсберги и др.);  $\sum Q_{\text{к}}$  – расход воздуха для проветривания камер;  $\sum Q_{\text{ут}}$  – утечки воздуха за пределами выемочных участков.

Коэффициент 1,1 учитывает неравномерность распределения воздуха по вентиляционной сети.

После расчета общешахтного количества воздуха необходимо сделать проверку сечения выработок по допустимой скорости воздуха. Для каждой выработки рассчитывается скорость движения воздуха по формуле

$$V_{\text{в}} = \frac{Q}{\gamma S_{\text{в}}}, \quad (8.8)$$

где  $Q$  – расход воздуха в выработке,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_{\text{в}}$  – сечение выработки в свету,  $\text{м}^2$ ;  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий загромождение выработки различным оборудованием.

Должно выполняться условие

$$V_{\text{min}} \leq V_{\text{в}} \leq V_{\text{max}}, \quad (8.9)$$

где  $V_{\text{min}}$ ,  $V_{\text{max}}$  – минимальная и максимальная скорость воздуха для данной выработки.

При  $V_{\text{в}} > V_{\text{max}}$  необходимо увеличивать сечение выработки или пускать воздух по двум выработкам. В зарубежной практике к очистному забою иногда подходят по 3-4 конвейерных и вентиляционных штрека, что снимает все ограничения по скорости воздуха.

### ***8.5. Расчет общешахтной депрессии***

Депрессией шахты называется разность давлений в точках входа и выхода воздуха из шахты на поверхность. Эта разность давлений создается вентилятором и может поддерживать давление в шахте выше или ниже атмосферного в зависимости от принятого способа проветривания. При проектировании вентиляции шахт общешахтная депрессия определяется как сумма депрессий отдельных участков вентиляционной сети, для чего выбирается маршрут наиболее трудный с точки зрения аэродинамического сопротивления выработок и с обязательным включением в него очистного забоя.

Величина потери депрессии на преодоление каждого участка, включенного в выбранный маршрут, определяется по формуле

$$h = \alpha \frac{LP}{S^3} Q^2, \quad (8.10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления данного участка,  $\text{Н}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$ ;  $L$  – длина выработки, м;  $P$  – периметр поперечного сечения выработки, м;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки,  $\text{м}^2$ ;  $Q$  – количество воздуха, проходящего по выработке,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Коэффициент  $\alpha$  выбирается для проектируемых шахт по справочнику, для действующих – опытным путем.

После суммирования депрессий по отдельным участкам вводятся дополнительные коэффициенты на потерю давления в канале вентилятора и в самом вентиляторе, каждый из которых равен 0,9. Тогда общешахтная депрессия, которую должен обеспечивать вентилятор, будет равна

$$h_{\text{ш}} = \frac{\sum h_i}{0,9 \cdot 0,9}, \quad (8.11)$$

где  $\sum h_i$  – сумма депрессий по отдельным участкам вентиляционной сети, Па.

Все рассчитанные значения депрессий отдельных участков сети сводятся в таблицу, где содержатся все данные о горных выработках, по которым должна проходить вентиляционная струя (образец табл. 8.1).

По результатам расчета депрессии строится депрессионная диаграмма в координатах  $h - l$ , где  $l$  – длина каждого участка. Откладывая на оси абсцисс длину участка, а по оси ординат – потерю давления на нем, получим график изменения депрессии для всей шахты, который в начале маршрута имеет максимум, а в конце маршрута приходит в ноль (если был принят нагнетательный способ проветривания). При всасывающем способе проветривания депрессионная диаграмма начинается с нуля и в конце маршрута приходит к максимуму, но со знаком минус (рис. 8.1).

Таблица 8.1

## Расчет общешахтной депрессии

№ п/п	Наименование выработки	Коэффициент аэродинамического сопротивления $\alpha \cdot 10^4, \text{Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$	Длина выработки, м	Поперечное сечение, $\text{м}^2$	Периметр, м	Количество воздуха, $\text{м}^3 / \text{с}$	Депрессия, Па	
							min	max
1	Выработка № 1 Выработка № 2 и т. д.							
							$\Sigma h_{\min}$	$\Sigma h_{\max}$

\*Примечание: в колонке «длина выработки» ставится ее минимальное и максимальное значения.

По углам наклона отрезков депрессионной диаграммы можно судить об аэродинамическом сопротивлении данной выработки: чем больше наклон, тем больше тратится напора на преодоление ее сопротивления.

В заключение следует заметить, что при необходимости в расчет общешахтной депрессии может быть включена и естественная тяга, которая может облегчать или затруднять работу вентилятора главного проветривания.

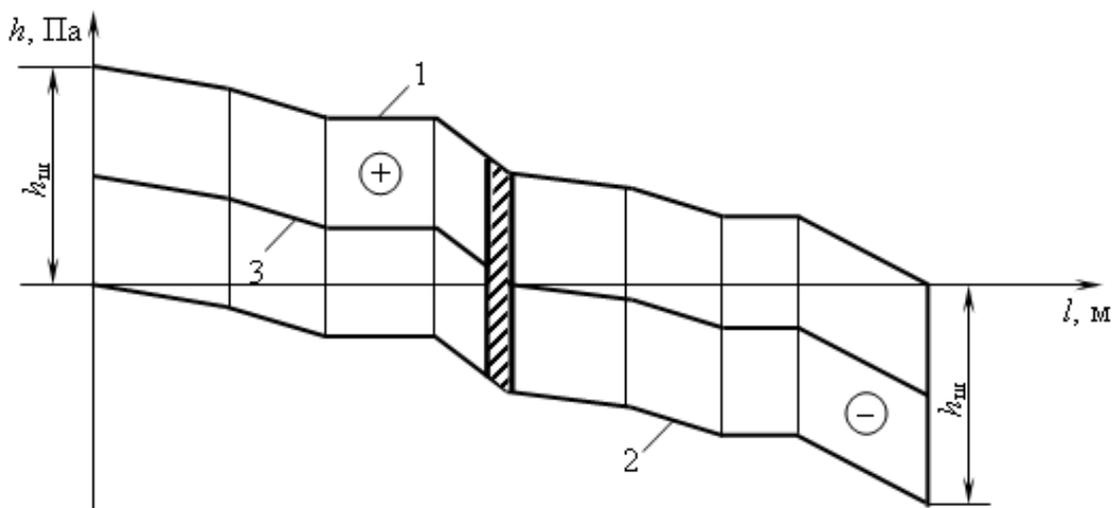


Рис. 8.1. Депрессионная диаграмма при нагнетательном (1), всасывающем (2) и нагнетательно-всасывающем (3) проветривания шахты. Штриховкой показано давление в зоне очистного забоя

## **8.6. Выбор вентилятора главного проветривания**

Вентилятор главного проветривания шахты выбирается на основе рассчитанных значений требуемого количества воздуха и общешахтной депрессии. Выбранный вентилятор должен обеспечивать надежное проветривание, иметь высокий КПД (не менее 0,8), а также иметь резерв по производительности и напору на перспективу при развитии вентиляционной сети шахты. Вентиляторы главного проветривания могут быть по конструктивному исполнению как осевые, так и центробежные. Осевые вентиляторы имеют более низкий напор и низкую производительность в сравнении с центробежными и применяются на шахтах, обрабатывающих первые горизонты и имеющих относительно небольшую вентиляционную сеть.

Центробежный вентилятор имеет большую степень сжатия воздуха в спиралевидном корпусе и, соответственно, развивает более высокую депрессию, что позволяет проветривать шахту с большим аэродинамическим сопротивлением.

В настоящее время типовой ряд вентиляторов главного проветривания центробежного типа включает следующие марки: ВЦ-31,5, ВЦД-31,5, ВЦД-47,5, ВЦД-47 «Север» и ВЦД-42,5.

Осевые вентиляторы представлены марками ВОД-30, ВОД-40М, ВОД-50, а также одноступенчатыми реверсивными высокоскоростными вентиляторами нового поколения серии ВО: ВО-22РЗ, ВО-34РЗ, ВО-48РЗ. Цифры в марках вентиляторов обозначают диаметр рабочего колеса в дециметрах.

Выбор конкретного типа вентилятора осуществляется по расчетным значениям расхода воздуха и общешахтной депрессии по графикам на рис. 8.2.

Выбор главного вентилятора следует начинать с осевых вентиляторов, постепенно увеличивая диаметр рабочего колеса. Если осевые вентиляторы не подходят по напору, начинают выбор из центробежных вентиляторов, используя полученные при стендовых испытаниях области экономичного режима с  $\eta \geq 0,8$ .

Выбранный вентилятор должен экономично работать в течение всего срока службы и иметь резерв для увеличения в случае необходимости. Если это не выполняется, то выбирают другой вентилятор с более высокими значениями по производительности и напору.

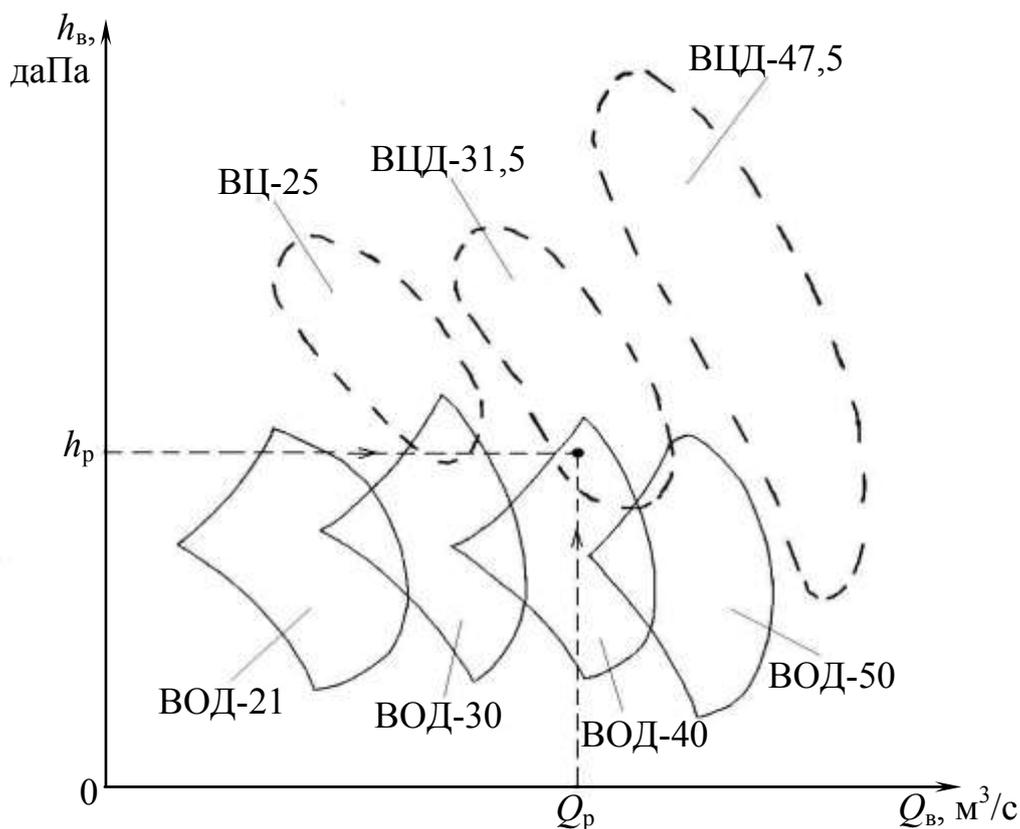


Рис. 8.2. Графики для выбора главного вентилятора шахты по рассчитанным значениям производительности и напора

Центробежный вентилятор, по сравнению с осевым, сильнее сжимает всасываемый воздух в спиралевидном кожухе, имеет большую степень сжатия и выбрасывает из себя воздух под бóльшим напором, развивая бóльшую депрессию. Он тяжелее, потребляет больше электроэнергии и, следовательно, дороже в изготовлении и в эксплуатации. Но в то же время он может проветривать более протяженную шахту с бóльшим аэродинамическим сопротивлением. Диаметр рабочего колеса обеспечивает большую подачу (расход) воздуха.

В случае когда точка пересечения абсциссы и ординаты попадает близко к границе области оптимальной работы какого-либо вентилятора, следует выбрать другой вентилятор, где будет обеспечен соответствующий резерв. На рис. 8.2 расчетная точка попала на область вентилятора ВОД-40, но у него будет малый резерв увеличения производительности и напора. В этом случае лучше выбрать центробежный вентилятор ВЦД-31,5.

## **Контрольные вопросы к главе 8**

1. Как выбирается способ и схема вентиляции шахты?
2. Как осуществляется прогноз газообильности шахты?
3. По каким критериям рассчитывается количество воздуха для проветривания шахт?
4. Как рассчитывается общешахтная депрессия?
5. Что характеризует депрессионная диаграмма при разных способах проветривания шахты?
6. Как выбирается вентилятор главного проветривания шахты?
7. От каких факторов зависит устойчивая работа вентилятора на шахтную сеть?
8. Что такое аварийные вентиляционные режимы?

## **9. КОНТРОЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ**

### ***9.1. Служба аэрологической безопасности***

Шахтная атмосфера представляет собой аэрогазовую среду, содержащую множество компонентов, обладающих самыми различными свойствами как с точки зрения вредного воздействия на человека, так и с точки зрения возникновения аварийных ситуаций в виде взрыва метановоздушной смеси. Атмосфера в горных выработках характеризуется значительной динамикой содержащихся компонентов во времени и пространстве, что требует непрерывного контроля ее состава независимо от характера технологических процессов.

Правила безопасности в угольных шахтах устанавливают порядок и периодичность замеров вредных газов и метана в горных выработках, а для шахт III категории, сверхкатегорных и опасных по внезапным выбросам угля и газа требуют круглосуточного контроля шахтной атмосферы средствами автоматической газовой защиты, обеспечивающим контроль за концентрацией метана в исходящих струях очистных и подготовительных забоев, крыла шахты и шахты в целом, скоростью воздуха, проходящего по выработкам, температурой воздуха и относительной влажностью.

Результаты замеров состава воздуха в горных выработках заносят в вентиляционный журнал, оформленный в соответствии с Инструкцией по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану или диоксиду углерода.

Во всех местах замера расхода воздуха устанавливают измерительные доски (аншлаги), на которых указывают дату измерения, сечение горной выработки, скорость воздуха, расчетный и фактический расход воздуха.

В действующих горных выработках шахты устанавливают стационарные датчики системы автоматической газовой защиты, предусмотренные проектом. При производстве взрывных работ замеры концентрации метана осуществляют в соответствии с Едиными правилами безопасности при взрывных работах. Специалисты структурных подразделений, дающие наряд, и лицо, утверждающее наряд, должны быть ознакомлены с результатами контроля рудничной атмосферы.

Загазирования горных выработок подлежат рассмотрению и учету в соответствии с Инструкцией по разгазированию горных выработок, расследованию, учету и предупреждению загазирования. Сведения о загазировании ежеквартально передаются в территориальный орган Ростехнадзора. Кроме того, специалисты службы аэрологической безопасности шахт регистрируют параметры работы главного вентилятора с соответствующими записями в журнале.

В современных крупных угледобывающих холдингах в целях обеспечения комплексной аэрологической безопасности подземной угледобычи организуются единые диспетчерско-аналитические центры, осуществляющие контроль за аэрогазовой ситуацией группы шахт, куда поступает телеметрическая информация из каждого очистного и подготовительного забоя, конвейерных выработок и других важных в аэрологическом плане объектов. В частности, подобные центры функционируют в АО «СУЭК-Кузбасс», АО «Распадская угольная компания», «Холдинговая компания» ЗАО СДС-Уголь. Все они оснащены средствами централизованного контроля состояния промышленной безопасности.

## 9.2. Приборы для контроля шахтной атмосферы

Комплекс приборного оборудования для контроля состояния шахтной атмосферы включает приборы для измерения микроклимата в горных выработках, включая скорость воздуха, относительную влажность и температуру, запыленность воздуха, барометрическое давление, концентрацию метана и других газов, появление которых обусловлено технологическими процессами или средствами транспорта.

### 9.2.1. Приборы для измерения скорости воздуха в горных выработках

Крыльчатый анемометр АСО-3 (рис. 9.1) служит для замера скорости воздуха в пределах от 0,1 до 5 м/с.

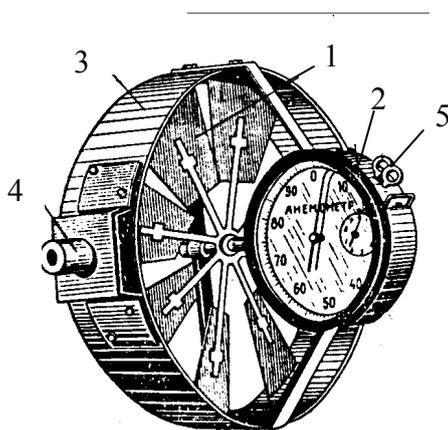


Рис. 9.1. Крыльчатый анемометр АСО-3

Крыльчатый анемометр АСО-3 состоит из крыльчатки 1, счетчика 2, числа оборотов крыльчатки, цилиндрического кожуха 3, в котором вращается крыльчатка, ручки для держания анемометра в нужном положении (ввинчиваемой в отверстие 4), арретира 5 для включения и выключения счетчика и циферблата 6 со шкалой показаний счетчика. Записав начальные показания  $N_1$  счетчика и поместив после этого анемометр в одну из точек потока, ориентируя при этом плоскость вращения крыльчатки перпендикулярно оси потока, через 10–15 с включают одновременно арретир и секундомер. По конечному показанию  $N_2$  счетчика и отсчитанному времени  $T$  на секундомере (обычно 100 с) определяют число оборотов  $N$  крыльчатки по формуле

$$N = \frac{N_1 - N_2}{T}, \quad (9.1)$$

а по подсчитанному значению  $N$  находят на тарировочном графике, имеющемся при каждом анемометре, истинную скорость воздуха, замеренную в точке установки анемометра.

Чашечный анемометр МС-13 (рис. 9.2) отличается от крыльчатого анемометра тем, что у него для восприятия скорости потока служит вертушка из четырех полусферических чашечек 1, установленных на концах двух взаимно-перпендикулярных стерженьков. Стерженьки закреплены на общей оси 3, связанной со счетчиком оборотов вертушки, помещенным в корпусе 2. Чашечным анемометром измеряют скорости воздуха от 1 до 20 м/с. Порядок замера аналогичен крыльчатому анемометру.

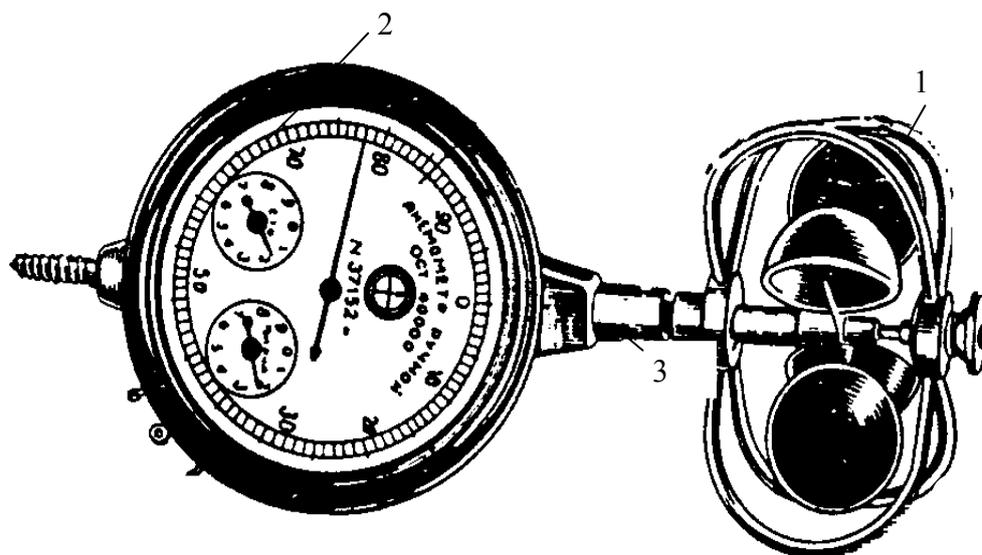


Рис. 9.2. Чашечный анемометр МС-13

Скорость движения воздуха в поперечном сечении выработок распределяется неравномерно: в центре она больше, у стенок — меньше. Измерение средней скорости воздуха производят следующими способами: «в сечении», «перед собой», «по точкам» (рис. 9.3).

При измерении «в сечении» замеряющий встает спиной к одному борту выработки и, держа анемометр в вытянутой руке и перемещаясь поперек выработки, обводит равномерно по всему сечению анемометром так, как это показано на рис. 9.3. Секундомер и

счетный механизм анемометра должны включаться одновременно. Время замера обычно принимают 100 секунд.

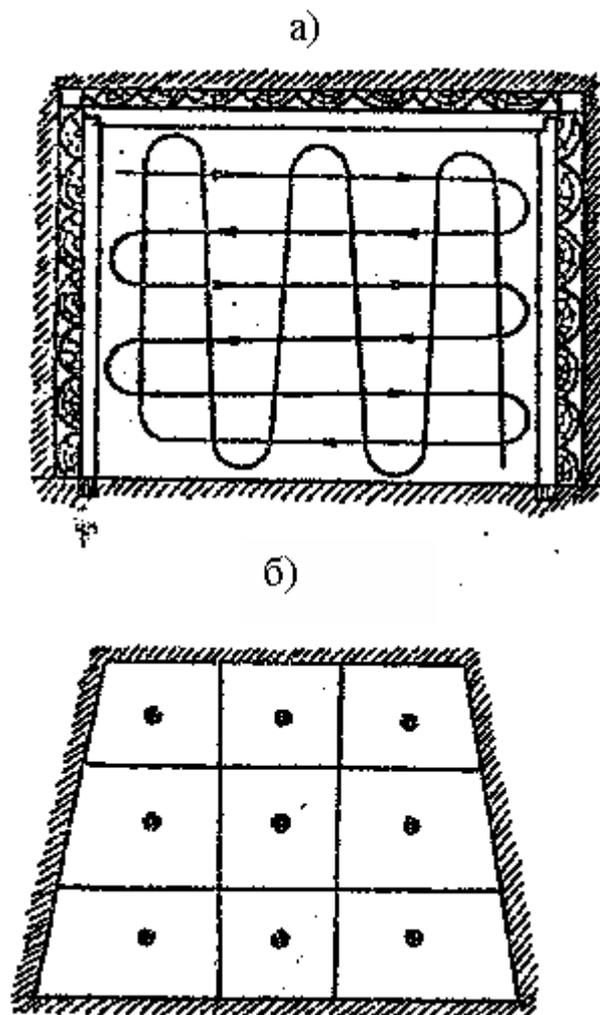


Рис. 9.3. Схемы измерения скорости движения воздуха: а – методом обвода поперечного сечения выработки; б – точечным методом по секциям поперечного сечения выработки

Полученную разницу в показаниях стрелок анемометра до и после замера делят на продолжительность замера в секундах. В полученный результат вносят поправку на способ замера, которая в данном случае зависит от площади сечения выработки  $S$  и может быть определена по формуле или взята из табл. 9.1.

Таблица 9.1

Поправка на способ замера скорости воздуха анемометром МС-13

$S$	8	7	6	5	4	3	2
$K$	0,95	0,94	0,93	0,92	0,90	0,87	0,80

При замере «перед собой» замеряющий встает лицом навстречу вентиляционной струе и, держа анемометр в вытянутой руке перед собой, обводит им сечение так же, как и в предыдущем случае. Поправка на способ замера принимается постоянной и равной 1,14.

При замере «по точкам» сечение выработки разбивают на площадки, как показано на рис. 9.3, и измеряют скорость воздуха в центре каждой из них, перемещая включенный анемометр последовательно из одной точки в другую. В каждой точке анемометр держат обычно 10–30 с. Разность отсчетов по анемометру до и после измерения делят на общее время замера.

Наиболее распространены первые два способа. Замеры по точкам производятся в диффузорах вентиляторов; иногда этот способ применяется в выработках при малых скоростях движения воздуха.

### ***9.2.2. Приборы для измерения температуры воздуха в выработках***

В практике рудничной вентиляции для измерения температуры воздуха применяются технические термометры и термографы.

**Термометры** бывают палочные, прачевые и со вставной шкалой. Наибольшее распространение получили жидкостные термометры, в которых в качестве жидкости используются ртуть или спирт. Ртутные термометры по конструктивному исполнению могут быть обычными и максимальными. Максимальные термометры фиксируют максимальную температуру за весь период измерения, что обеспечивается сужением ртутного капилляра, через которое ртуть при повышении температуры может подниматься, а при понижении ртутный столбик обрывается, что позволяет сохранять максимальное значение температуры. В минимальных термометрах в спиртовом капилляре находится неподкрашенный спирт, в котором плавают пластмассовый штифт, перемещающийся при понижении температуры до минимального значения. Таким образом фиксируется минимальная температура за весь период измерения.

Палочные термометры представляют собой толстостенный капилляр с внешним диаметром, почти равным диаметру резервуара. Шкала с делениями нанесена непосредственно на внешней поверхности капилляра. В настоящее время данные термометры представляют исторический интерес и на практике не используют-

ся. То же можно сказать и о прачевых. Максимальный и минимальный термометры представлены на рис. 9.4.

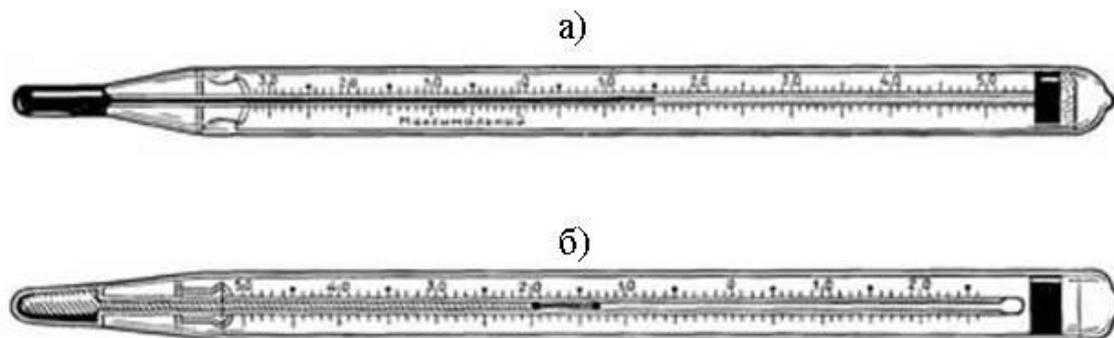


Рис. 9.4. Термометры: а – максимальный (ртутный);  
б – минимальный (спиртовый)

**Термограф** применяется для записи температуры воздуха, имеет воспринимающую и регистрационную части. На металлической площадке укреплена вертикальная ось с барабаном, внутри которого помещен часовой механизм. В верхней части крышки барабана сделаны отверстия для выхода оси барабана, для заводного ключа часового механизма. Часовой механизм может иметь суточный и недельный завод.

На барабане при помощи металлической пластинки закреплена разграфленная бумажная лента. Запись осуществляется пером, укрепленным на длинном стержне, соединенном с воспринимающей частью прибора. Воспринимающая часть термографа представляет собой биметаллическую пластину, изменяющую свою кривизну с изменением температуры (рис. 9.5).

Из современных образцов приборов для измерения температуры следует выделить термометр электронный ТГО-2МП, предназначенный для измерения температуры и относительной влажности в угольных шахтах, опасных по газу и пыли.

Термометр ТГО-2МП выполняет следующие функции:

- 1) текущее измерение температуры и влажности воздушно-газовой среды в месте нахождения прибора;
- 2) текущее измерение температуры на расстоянии до 2,5 м от места нахождения прибора с использованием телескопического удлинителя;

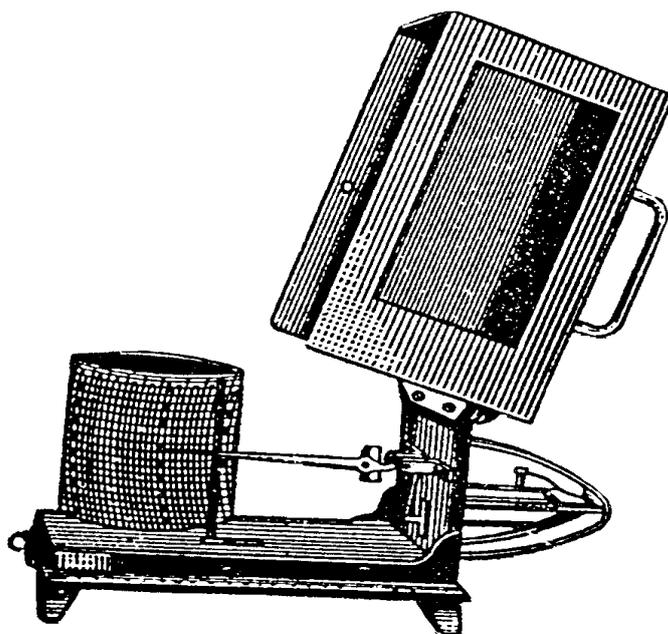


Рис. 9.5. Термограф

3) регистрацию в памяти по команде оператора двадцати значений измеряемой температуры с указанием номера регистрации и технологического времени момента записи в память информации;

4) регистрацию в памяти по команде оператора двадцати значений измеряемой относительной влажности воздуха с указанием номера регистрации и технологического времени момента записи в память информации;

5) хранение зарегистрированной информации как в режиме текущих измерений, так и при выключенном питании;

6) вывод зарегистрированной информации из памяти по команде оператора на символьный дисплей о температуре или относительной влажности;

7) очистку памяти по команде оператора от хранящейся информации о двадцати значениях температуры и двадцати значениях влажности одновременно;

8) выработку предупреждающего сигнала при возрастании измеряемой температуры до  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  в виде единичной звуковой посылки, состоящей из трех сигналов;

9) выработку сигнала тревожной тональности, при возрастании измеряемой температуры до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше (многократно с периодом 1 минута). Выключение тревожного периодического звукового сигнала происходит при снижении измеряемой температуры до  $39,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже.

10) контроля снижения напряжения питания с отображением на символьном дисплее в виде трех элементного символа «Ш».

11) Для увеличения длительности непрерывной работы прибора применены функции перевода процессорной системы в режим малого потребления и автоматическое отключение подсветки символьного дисплея.

12) Для повышения комфортности работы с прибором, управляющей программой формируются информационные и предупреждающие сигналы в виде надписей на дисплее и звуковых сигналов.

Общий вид прибора изображен на рис. 9.6.



Рис. 9.6. Общий вид прибора ТГО-2МП

### ***9.2.3. Приборы для измерения влажности воздуха***

Различают абсолютную и относительную влажность воздуха. Абсолютной влажностью воздуха называется масса водяного пара в граммах, содержащегося в одном кубическом метре воздуха. Относительной влажностью воздуха называется отношение веса водяных паров во влажном воздухе к весу водяных паров при полном его насыщении, при той же температуре, выраженное в процентах.

$$\psi = \frac{W_{\text{абс}}}{W_{\text{max}}}. \quad (9.2)$$

Для замера влажности воздуха применяются психрометры из парных термометров, психрометры с вентиляторами, гигрометры и гигрографы.



Рис. 9.7. Психрометр

Психрометрами с вентиляторами пользуются для определения влажности при условии, что температура воздуха не превышает  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и не ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По конструкции психрометры делятся на большую и малую модели. Прибор (рис. 9.7) состоит из двух термометров, резервуары которых заключены в защитные трубчатые оправы, и аспиратора для всасывания воздуха.

Аспирационный психрометр Ассмана состоит из двух одинаковых ртутных термометров, один из которых всегда сухой, а второй перед замером смачивается водой специальной грушей. В верхней части психрометра находится аспирационное устройство в виде вентилятора, который заводится специальным ключом непосредственно перед измерением влажности до отказа.

Затем психрометр подвешивается в точке замера и выдерживается 3–4 минуты. Относительная влажность определяется по показаниям сухого термометра и разности показаний сухого и влажного термометров по психрометрической таблице (табл. 9.2). Показание влажного термометра должно быть всегда ниже, чем сухого.

Абсолютную влажность (упругость водяного пара, мм рт. ст.) определяют по формуле

$$e = E_1 - 0,5(t - t_1)H/755$$

где  $E_1$  – максимально возможная упругость водяного пара при температуре смоченного термометра;  $t$  – температура воздуха, изме-

ренная по сухому термометру;  $t_1$  – температура смоченного термометра;  $H$  – барометрическое давление воздуха.

Таблица 9.2

Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

Относительную влажность воздуха в процентах определяют на основании показаний сухого и мокрого термометра по психрометрическим таблицам или номограммам, прилагаемым к психрометру.

**Гигрограф.** Приемной частью прибора (рис. 9.8) служит пучок обезжиренных волос, изменяющий свои упругие свойства с изменением относительной влажности. При возрастании относительной влажности пучок волос удлиняется и перо идет вверх, при уменьшении – опускается.

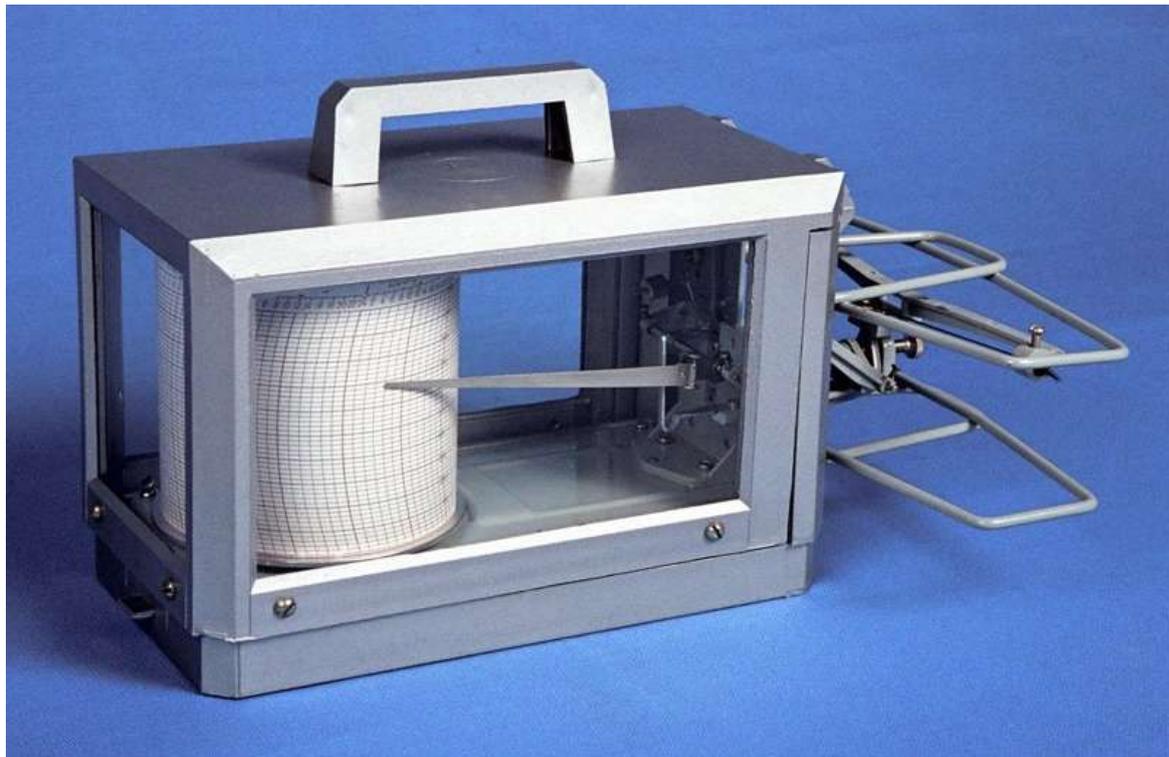


Рис. 9.8. Гигрограф

#### ***9.2.4. Приборы для измерения барометрического давления***

В горных выработках шахт барометрическое давление отличается от атмосферного на поверхности. Это зависит от способа проветривания шахты (нагнетательный или всасывающий). При нагнетательном способе давление в шахте всегда выше атмосферного, при всасывающем – ниже. На человека эти отклонения не оказывают существенного влияния, но они могут формировать разное направление утечек воздуха через выработанное пространство. Основное назначение приборов для измерения барометрического давления – это производство депрессионных съемок.

Для этой цели применяются различные виды барометров, предназначенных для работы в подземных условиях. Принципиальная схема барометра-анероида представлена на рис. 9.9.

В шахтных условиях используются микробарометры и барометры-анероиды, предназначенные для измерения давления в отдельных точках при производстве депрессионных съемок. Учитывая, что все барометры обладают некоторой инерционностью, необходимо при переходе от одной точки замера к другой ждать 15–20 минут для восприятия нового уровня давления. Если между двумя точками замера имеется разность высотных отметок, то вво-

дится соответствующая поправка. Микробарометры обеспечивают измерение давления в диапазоне 7200–8400 Па. Погрешность измерений  $\pm 3$  Па.

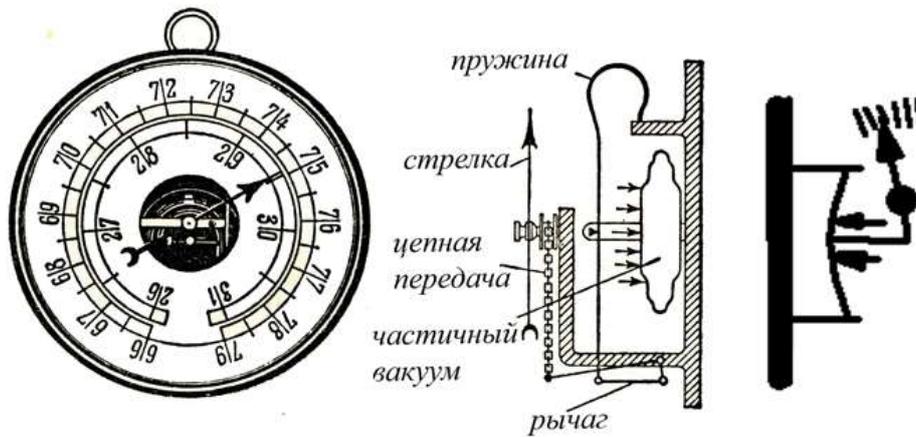


Рис. 9.9. Принципиальная схема устройства барометра-анероида

Для измерения давления также применяются микроманометры с наклонной шкалой ММН (рис. 9.10).

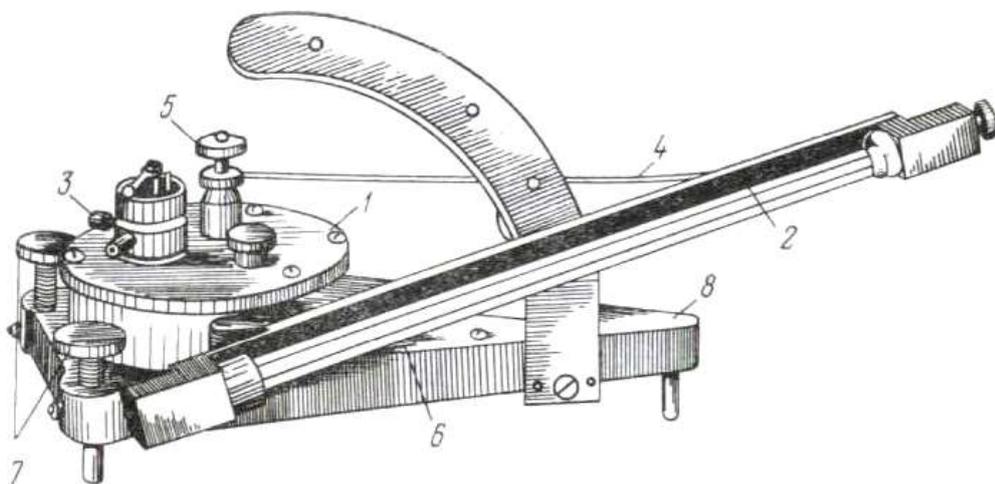


Рис. 9.10. Микроманометр с наклонной шкалой:  
 1 – металлический резервуар; 2 – измерительная трубка;  
 3 – трехходовый кран; 4 – резиновый шланг;  
 5 – регулирующий барабан; 6 – уровень;  
 7 – винты для регулирования горизонтального  
 положения подставки; 8 – подставка

Микроманометр состоит из металлического резервуара, соединенного резиновым шлангом со стеклянной измерительной трубкой, устанавливаемой под разными углами наклона, соответствующими значениям фактора прибора 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8. Конец измерительной трубки соединяется резиновым шлангом с трехходовым краном, который осуществляет подключение резервуара измерительной трубки к замерным точкам. Микроманометр ММН обеспечивает измерение давления в диапазоне до 250 даПа.

Из более современных типов приборов для измерения давления следует отметить электронные барометры (рис. 9.11), предназначенные для измерения всех параметров шахтной атмосферы.



Рис. 9.11. Электронный барометр для измерения давления в горных выработках

Измеритель абсолютного и дифференциального давления МБГО-2 применяется для измерения давления в горных выработках угольных и сланцевых шахт, опасных по газу и угольной пыли, при ведении депрессионных съемок (рис. 9.12).

Принцип действия прибора МБГО-2 – преобразование входного механического воздействия газа датчиком в электрический сигнал, пропорциональный давлению, масштабное преобразование сигнала напряжения, преобразование аналогового напряжения в цифровой код и представление значений кода в паскалях или килопаскалях на знаковом дисплее.



Рис. 9.12. Общий вид прибора МБГО-2 в двух проекциях

### ***9.2.5. Приборы для замера концентрации газов***

Приборы для измерения концентрации газов в шахтной атмосфере бывают индивидуальными переносными, автоматическими, стационарными и встроенными. Различаются они также по принципу действия, по диапазонам измерений, по точности замеров.

В шахтных условиях наиболее удобными являются переносные портативные приборы, позволяющие определять результат на месте.

Для периодического замера в шахтном воздухе применяют химические газоанализаторы ГХ-4, ГХ-5, ГХ-6, УГ-2, предназначенные для экспресс-определения в шахтном воздухе малых концентраций оксида углерода, оксидов азота, сероводорода, сернистого газа и др. и основанные на принципе взаимодействия газа и реактива, нанесенного на твердый носитель – силикагель. Каждый реактив предназначен для определенного газа. Реактив заключен в стеклянную трубку.

Газоанализатор ГХ-4 рис. 9.13 состоит из мехового аспирационного насоса АМ-3 1 и набора индикаторных трубок. Каждый набор трубок предназначен только для определения одного газа.

Меховой насос служит для просасывания воздуха через трубку. В течение 3 секунд просасывается 100 мл воздуха.

Подготовка прибора ГХ-4 к работе заключается в проверке герметичности мехового насоса, для чего в мундштук 3 насоса вставляют запаянную индикаторную трубку 2, сжимают мех до

упора. Насос считается герметичным, если в течение 10 минут сжатый мех полностью не раскрылся.

Непосредственно на рабочем месте отламывают оба конца трубки в проушине насоса и вставляют трубку в мундштук насоса так, чтобы стрелка на трубке показала направление к насосу, после чего делают одно качание (однократное сжатие насоса), и если окраска порошка достигла первого деления или превысила его, замер газа следует прекратить и немедленно выйти на свежую струю, так как концентрация любого из определяемых газов в этом случае превышает предельно допустимые нормы.

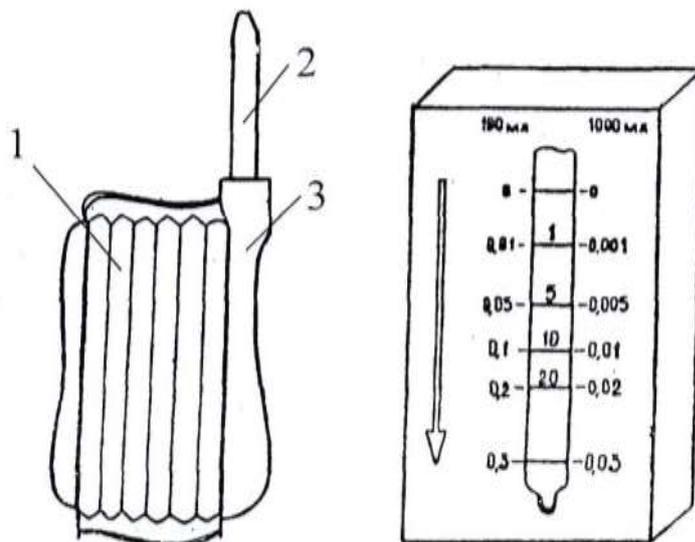


Рис. 9.13. Газоопределитель ГХ-4

Если после одного хода меха окраска не появилась или не достигла первого деления шкалы, замер продолжают и делают еще девять качаний меха (всего должно быть 10).

Значения концентраций газа определяют с помощью шкал, имеющих на упаковке; для этого трубку прикладывают к шкале так, чтобы маркировочное кольцо трубки совпало с делениями шкалы, а начало окрашенного столбика – с нулевым делением шкалы (рис. 9.13).

При одном качании насоса концентрация определяется по правой стороне шкалы, при 10 качаниях – по левой.

В случае полностью отрицательного результата индикаторную трубку можно использовать повторно до 5 раз в день.

Газоопределители ГХ-4 обеспечивают измерение концентрации оксида углерода, оксидов азота, сероводорода, сернистого газа в диапазонах 0,2; 0,005; 0,0066; 0,007 %, соответственно. Погрешность измерений  $\pm 0,25$  %.

На аналогичном принципе созданы и другие типы газоанализаторов ГХ-5, ГХ-6 и УГ-2. С помощью газоанализатора ГХ-5 определяется концентрация углекислого газа. В комплект ГХ-5 входят меховой аспиратор АМ-5 и индикаторные трубки с диапазонами измерений 15 и 50 %. Погрешность измерений составляет 10 % от верхней шкалы каждого типа трубки. Газоопределитель ГХ-6 служит для определения концентрации кислорода в шахтном воздухе. Газоопределитель состоит из аспиратора АМ-5 и индикаторных трубок.

Универсальными газоанализаторами УГ-2 можно определять содержание оксида углерода, оксидов азота, сероводорода, сернистого газа, хлора, паров бензина, бензола, этилового эфира, ацетилена, толуола, ксилола, углеводородов, нефти. Достоинство этих газоанализаторов заключается в том, что они позволяют быстро (в течение 1–5 мин) определить концентрацию газа. Недостатком их является малая точность определения (допустимая погрешность измерения  $\pm 25$  %).

Действие интерференционных газоанализаторов (ШИ-8, ШИ-10, ШИ-12) основано на измерении смещения интерференционных полос, вызванного различной оптической плотностью исследуемого газа и газа, находящегося в эталонной камере.

Шахтный интерферометр (рис. 9.14) состоит из металлического корпуса, в котором размещены электрическая лампочка для подсветки шкалы, газовоздушные коммуникации, оптическая схема, поглотительный патрон и источник питания.

В интерферометре ШИ-10 свет от лампы 5, пройдя конденсорную линзу К, параллельным пучком падает на зеркало 3, где разделяется на два интерферирующих луча. Один из них проходит полость 1 газовоздушной камеры А, заполненной шахтным воздухом, другой – полость 2, заполненную чистым атмосферным воздухом. Оба отражаются призмой 4 на зеркало 6, где сходятся в световой пучок, который зеркалом 0 отклоняется в объектив 8. Верхняя линза объектива подвижна, что дает возможность перемещать интерференционную картину вдоль отсчетной шкалы и устанавливать

ее в нулевое положение. Пучок света, выйдя из объектива, попадает в окуляр 9.

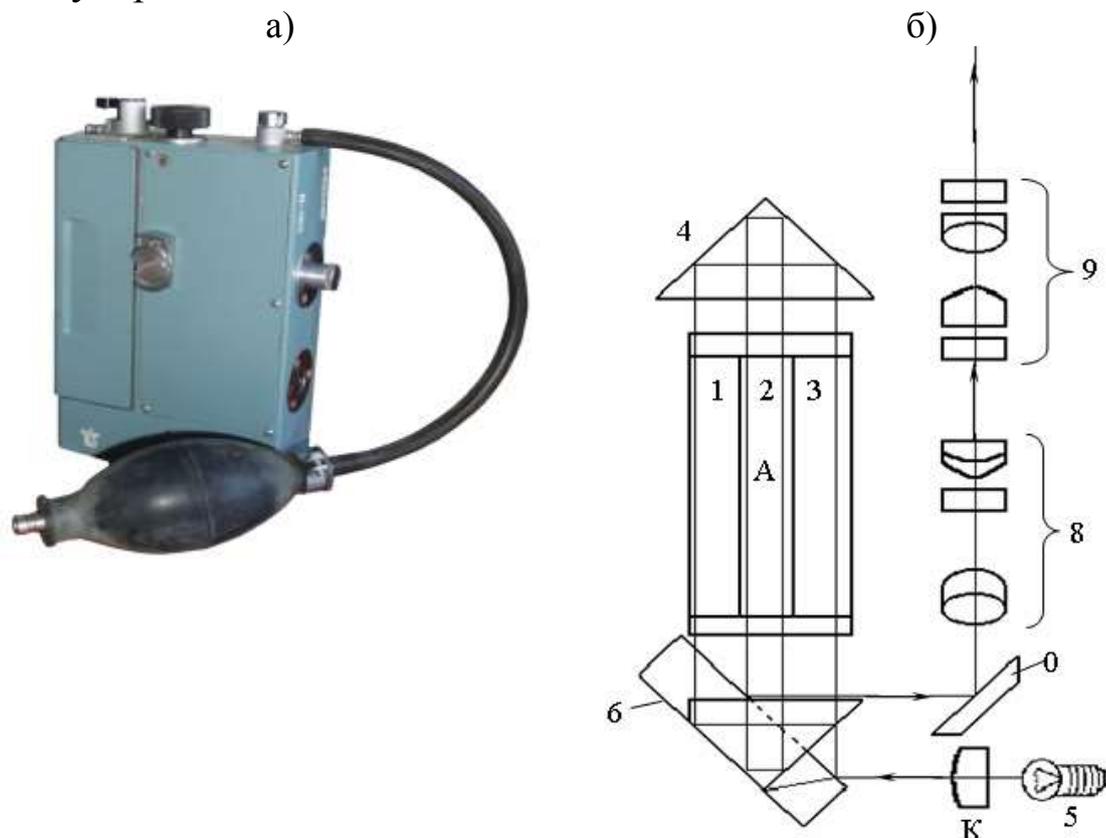


Рис. 9.15. Шахтный интерферометр ШИ-10:  
а – общий вид; б – оптическая схема

В результате прохождения двух интерферирующих лучей через разные газозвушные среды происходит смещение интерференционной картины, величина которой пропорциональна содержанию газа. Перед каждым спуском в шахту интерферометр необходимо заполнять свежим атмосферным воздухом. При последующих замерах в шахте новые порции воздуха, закачиваемые грушей, будут вытеснять воздух, закаченный от предыдущих измерений.

Стационарная система контроля выполняет несколько функций: показывает величину концентрации, подает сигнал опасности, отключает электроснабжение при превышении содержания метана в горных выработках.

С ростом категории газовой опасности шахты ужесточается контроль содержания метана. При этом на шахте более высокой категории опасности помимо оснащения новыми более совершенными средствами контроля сохраняются все средства, использовавшиеся ранее, когда шахта была менее опасной по метану.

На шахтах I категории ИТР выдаются переносные приборы эпизоотического действия (шахтные интерферометры ШИ-10, ШИ-11 с диапазоном измерений 0–6 %).

На шахтах II категории всем ИТР, а также комбайнерам и мастерам взрывникам выдаются переносные автоматические приборы-сигнализаторы «Сигнал-2» с диапазоном измерений 0–3 %, имеющие установки срабатывания звукового и светового сигналов 1; 1,5 и 2 %.

На шахтах III категории и сверхкатегорных на участках устанавливаются стационарные автоматические системы контроля метана (АКМ или «Метан»; пороги срабатывания: АКМ – 1 %, «Метан» – 1 % и 1,3 % через 20 с после повышения опасности). В последнее время такими системами стали оснащать и шахты II категории газовой опасности.

На шахтах, опасных по внезапным выбросам угля и газа, выдаются дополнительно индивидуальные автоматические сигнализаторы метана, совмещенные с шахтным головным светильником СМС-1, «Маяк» (выдаются всем работающим на выбросоопасных пластах, сигнализируют мигающим свечением с частотой 60 миганий в минуту при концентрации метана 2 %).

Кроме этого на шахтах II категории и выше используются автоматические встроенные комбайновые метанометры типа ТМРК, включающие при концентрации метана 1 % прерывистую световую сигнализацию, а при 2 % световая сигнализация становится непрерывной, после чего отключается энергоснабжение комбайна.

На шахтах при ведении дегазационных работ используются анализаторы концентрации метана в дегазационных газопроводимых автоматического действия АКД и эпизодического ШИ-7 с пределом измерений 0–100 %.

Помимо указанных отечественных средств контроля содержания метана используются зарубежные средства, аналогичные по функциональному назначению: «МИКОН», «ТРАНСМИТТОН», «ВЕНТУРОН» и др.

## Контрольные вопросы к главе 9

1. Какая служба на шахте осуществляет контроль аэрологической безопасности?
2. Какие приборы применяются для контроля шахтной атмосферы?
3. Где фиксируются результаты измерений шахтной атмосферы работниками служб аэрологической безопасности?
4. Как осуществляется замер концентрации метана в горных выработках?
5. Как осуществляется замер углекислого газа в горных выработках?
6. Где устанавливаются приборы автоматического газового контроля шахтной атмосферы?
7. При каком содержании метана в исходящих струях происходит отключение электроэнергии на участке?
8. Какие индивидуальные сигнализаторы метана выдаются горнорабочим?
9. Какая концентрация метана допускается на исходящих струях очистных и подготовительных забоев?
10. Какая концентрация метана допускается на исходящих струях крыла или шахты?
11. Какая концентрация метана допускается на входящих струях в очистной забой?
12. Какая концентрация метана допускается в местах скопления?
13. Нормируется ли содержание метана в выработанных пространствах шахт?

## **10. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛА «ВЕНТИЛЯЦИЯ ШАХТ» В ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

Целью раздела «Вентиляция шахты» в дипломном проекте является обоснование выбора схемы и способа проветривания шахты исходя из условий залегания угольных пластов, их мощности, газоносности, углов падения и других характеристик. На основе собранных материалов составляется прогноз абсолютной газообильности выемочного участка и рассчитывается нагрузка на очистной забой. При расчете абсолютной газообильности забоев необходимо учитывать дегазацию угольных пластов и ее влияние на остаточную газоносность.

Составляется условная и расчетная схема проветривания выемочного участка (блока, панели), обеспечивающая устойчивость вентиляционных струй по направлению. Производится расчет количества воздуха для проветривания шахты как сумма расходов по всем вентиляционным участкам по основным критериям: по газу, по количеству людей, по скорости воздуха и т. д.

Рассчитывается минимальная и максимальная депрессия шахты (на начальный и последующие периоды эксплуатации) и выбирается способ проветривания. По рассчитанным значениям количества воздуха и депрессии шахты выбирается вентилятор главного проветривания с резервом на ближайшие 5–10 лет.

Производится расчет и выбор калориферной установки.

В пояснительной записке должны быть следующие параграфы:

1. Выбор схемы вентиляции шахты;
2. Выбор схемы проветривания выемочного участка;
3. Выбор способа вентиляции шахты;
4. Выбор способов и схем проветривания подготовительных выработок;
5. Прогноз газообильности шахты;
6. Определение расхода воздуха для вентиляции шахты;
7. Распределение воздуха по выработкам и проверки сечения выработок по допустимой скорости его движения;
8. Расчет депрессии шахты и главного вентилятора;
9. Выбор главного вентилятора.

На демонстрационном чертеже к разделу должны быть изображены следующие позиции.

1. Вентиляционный план шахты (или ее основной части с проектируемым выемочным участком), используя принятые условные обозначения, а также с указанием по каждой выработке сечения, количество проходящего воздуха и его скорости движения;

2. Упрощенная вентиляционная схема шахты, тождественная вентиляционному плану, с указанием номеров вентиляционных узлов и направлений вентиляционных потоков;

3. Аэродинамическая схема вентиляции шахты с указанием номеров узлов и вентиляционных потоков;

4. График области промышленного использования выбранного главного вентилятора в координатах расход-депрессия с наличием точки пересечения линий, проходящих через их расчетные значения;

5. Депрессионная диаграмма от устья воздухоподающего до воздухоотводящего стволов в рабочем и аварийном (реверсивном) режимах вентиляции;

6. Таблица сводных значений по вентиляции шахты: абсолютная газообильность шахты ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ); относительная газообильность шахты ( $\text{м}^3/\text{т}$ ); категория газовой опасности шахты; способ вентиляции шахты; расход (подача) в шахту воздуха ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ) и ее депрессия (даПа); тип главного вентилятора.

Результаты, полученные при расчетах в пояснительной записке и отраженные на демонстрационном чертеже, должны соответствовать друг другу и выражаться одними и теми же единицами измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие «Аэрология горных предприятий» содержит основные сведения о рудничной атмосфере в современных условиях работы шахт, ее составных частях, их характеристиках, нормировании и источниках выделения. Даны элементы газовой динамики шахт, условия возникновения и реализации опасных газодинамических явлений, их связь с горно-геологическими факторами угольных месторождений, а также методы дегазации угольных пластов и расчет параметров работы дегазационных скважин, гарантирующих снижение природной газоносности до заданного уровня.

Особое значение для горного инженера имеет формирование представления об угольной шахте как о единой вентиляционной системе, являющей собой совокупность способа и схемы проветривания, и критериях их выбора при проектировании шахты.

Для этой цели в учебное пособие включены вопросы аэростатики и аэродинамики воздушных потоков, режимов их движения по горным выработкам, аэродинамического сопротивления и расчета вентиляционных сетей на основе узловых и контурных уравнений. Все вышеперечисленное в совокупности позволяет осуществить расчет требуемого количества воздуха и депрессию шахты, по которым выбирается вентилятор главного проветривания.

Полученные знания являются основополагающими для принятия грамотных решений горными инженерами в деле обеспечения безопасности работ в шахтах в современных условиях, когда наблюдается тенденция к резкому увеличению нагрузок на очистной забой и возрастает газовая опасность при ведении подземных горных работ с использованием высокопроизводительной выемочной техники.

## Список литературы

1. Правила безопасности в угольных шахтах. – Москва : ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2014. – 200 с.
2. Инструкция по дегазации угольных шахт. – Москва : ЗАО НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2016. – 250 с.
3. Экология и безопасность обработки месторождений полезных ископаемых: монография / К. С. Коликов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – 76 с.
4. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс, 1989. – 319 с.
5. Аэрология горных предприятий / К. З. Ушаков, А. С. Бургаков, Л. А. Пучков, И. И. Медведев. – Москва : Недра, 1982. – 421 с.
6. Гендлер, С. Г. Аэрология горных предприятий / С. Г. Гендлер, В. В. Смирняков. – Санкт-Петербург : Проспект Науки, 2016. – 200 с.
7. Ковалев, В. А. Аэрология горных предприятий / В. А. Ковалев, В. Н. Пузырев, Л. А. Шевченко; Кузбасс. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2013. – 180 с.
8. Справочник по рудничной вентиляции. – Москва : Недра, 1977. – 328 с.
9. Справочник горного инженера угольной шахты. – Москва: Недра, 1982. – 454 с.
10. Скочинский А. А. Рудничная вентиляция / А. А. Скочинский, В. Б. Комаров. – Москва : Углетехиздат, 1959. – 623 с.
11. Соболев, Г. Г. Горноспасательное дело. – Москва : Недра, 1972. – 358 с.
12. Учебно-методическое пособие по проектированию вентиляции горных предприятий / Н. О. Каледина, С. С. Кобылкин, О. С. Каледин, А. С. Кобылкин. – Москва : Горная кгина, 2016. – 80 с.
13. Шевченко, Л. А. Влияние режима работы комбайна на газовыделение из отбитого угля при высоких нагрузках на очистной забой / Л. А. Шевченко, В. А. Зубарева // Вестник КузГТУ. – № 3. – 2018. – С. 50-55.
14. Шевченко Л. А. Формирование аэрогазовой ситуации в протяженных конвейерных выработках угольных шахт // Уголь. – № 11. – 2018. – С. 36-41.
15. Инструкция по разгазированию горных выработок, расследованию, учету и предупреждению загазований. – Москва : НТЦ «Промышленная безопасность», 2012. – 12 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	3
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. ШАХТНАЯ АТМОСФЕРА</b> .....	6
1.1. Основные компоненты шахтной атмосферы .....	6
1.2. Метан .....	9
1.3. Метаноносность угольных пластов и метанообильность горных выработок .....	13
1.4. Виды выделения метана в шахтах .....	16
1.5. Газовый баланс угольных шахт .....	18
1.6. Прогноз газообильности шахт .....	19
1.7. Газовый режим угольных шахт .....	24
Контрольные вопросы к главе 1 .....	25
<b>2. ПРОЦЕССЫ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В ШАХТАХ</b> .....	25
2.1. Газовыделение с обнаженной поверхности угольного пласта .....	25
2.2. Газовыделение из отбитого угля .....	26
2.3. Газовыделение при взрывных работах .....	37
2.4. Газовыделение из выработанных пространств .....	38
2.5. Газовыделение при работе двигателей внутреннего сгорания .....	43
Контрольные вопросы к главе 2 .....	44
<b>3. ШАХТНАЯ АЭРОМЕХАНИКА</b> .....	44
3.1. Основные законы аэростатики .....	44
3.2. Основные понятия аэродинамики .....	46
3.3. Основные законы аэродинамики .....	46
3.3.1. Закон сохранения массы .....	46
3.3.2. Закон сохранения энергии .....	48
3.3.3. Режимы движения воздуха в шахтах .....	49
3.3.4. Характеристики турбулентных свободных струй .....	51
3.3.5. Закон сопротивления .....	52
Контрольные вопросы к главе 3 .....	52
<b>4. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК</b> .....	53
4.1. Природа аэродинамического сопротивления движению воздуха в горных выработках .....	53
4.2. Сопротивление трения .....	54

4.3. Местное сопротивление.....	56
4.4. Лобовое сопротивление.....	57
4.5. Эквивалентное отверстие шахты.....	58
Контрольные вопросы к главе 4.....	60
<b>5. ШАХТНЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СЕТИ.....</b>	<b>60</b>
5.1. Общие сведения.....	60
5.2. Классификация шахтных вентиляционных сетей.....	61
5.3. Основные законы движения воздуха в шахтных вентиляционных сетях.....	63
5.4. Источники движения воздуха в шахте.....	65
5.5. Регулирование распределения расхода воздуха в вентиляционной сети шахты.....	69
5.6. Изменение режима работы главного вентилятора.....	75
5.7. Естественная тяга.....	76
5.8. Вентиляционные режимы при авариях.....	78
Контрольные вопросы к главе 5.....	79
<b>6. ВЕНТИЛЯЦИЯ ШАХТ.....</b>	<b>80</b>
6.1. Способы вентиляции шахт.....	80
6.2. Схемы вентиляции шахт.....	82
6.3. Схемы вентиляции выемочных участков.....	83
6.4. Схемы вентиляции тупиковых выработок.....	89
6.5. Схемы вентиляции при разработке угольных пластов, склонных к самовозгоранию.....	92
Контрольные вопросы к главе 6.....	93
<b>7. УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ В ШАХТАХ.....</b>	<b>93</b>
7.1. Газовый барьер и основные принципы управления ме- тановыделением на выемочных участках.....	93
7.2. Способы управления метановыделением средствами вентиляции.....	94
7.3. Способы и схемы управления метановыделением средствами дегазации.....	97
7.4. Способы и схемы управления метановыделением путем увлажнения пластов.....	102
7.5. Управление газовой выделением путем изменения порядка выемки слоев в мощном пласте или пластов в свите.....	102
7.6. О возможности и целесообразности добычи метана из угольных месторождений Кузбасса.....	105
Контрольные вопросы к главе 7.....	108

<b>8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ</b> .....	108
8.1. Выбор способа вентиляции шахты.....	108
8.2. Выбор схемы вентиляции шахты.....	109
8.3. Прогноз газообильности шахт.....	110
8.4. Расчет количества воздуха для проветривания шахт.....	113
8.5. Расчет общешахтной депрессии.....	115
8.6. Выбор вентилятора главного проветривания.....	118
Контрольные вопросы к главе 8.....	119
<b>9. КОНТРОЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ШАХТ</b> .....	119
9.1. Служба аэрологической безопасности.....	119
9.2. Приборы для контроля рудничной атмосферы.....	122
9.2.1. Приборы для измерения скорости воздуха в горных выработках.....	122
9.2.2. Приборы для измерения температуры воздуха в выработках.....	125
9.2.3. Приборы для измерения влажности воздуха.....	128
9.2.4. Приборы для измерения барометрического давления.....	131
9.2.5. Приборы для замера концентрации газов.....	134
Контрольные вопросы к главе 9.....	139
<b>10. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛА «ВЕНТИЛЯЦИЯ ШАХТ» В ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ</b> .....	140
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	142
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	143

Шевченко Леонид Андреевич

**АЭРОЛОГИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ*

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 17.02.2020. Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе

Уч.-изд. л. 9,2. Тираж 100 экз. Заказ

Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Издательский центр УИП Кузбасского государственного технического  
университета имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а