

В. А. Портола

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Учебное пособие

Кемерово 2008

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет»

В.А. Портола

## ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Учебное пособие

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению «Горное дело» и по специальности «Безопасность технологических процессов и производств (горная промышленность)» направления подготовки «Безопасность жизнедеятельности»

Кемерово 2008

УДК 622.822  
ББК 33.18

Рецензенты:

Ведущий научный сотрудник Института угля и углехимии СО РАН,  
д-р техн. наук Д. Ю. Палеев

Зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности Юргинского техно-  
логического института (Томского политехнического университета)  
канд. техн. наук В. М. Гришагин

Портола, В. А. Пожарная безопасность горных предприятий : учеб.  
пособие / В. А. Портола ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2008. – 158 с.

ISBN 978-5-89070-632-4

Рассмотрены условия возникновения пожаров на горных предпри-  
ятиях, основные химические процессы окисления, режимы горения. При-  
ведены особенности развития экзогенных пожаров на ленточных конвейе-  
рах, при горении горючей крепи горных выработок, а также основные при-  
чины возникновения эндогенных пожаров, влияние основных параметров  
угольных скоплений и окружающего воздуха на течение процесса само-  
возгорания угля. Описаны способы и средства обнаружения рудничных  
пожаров, определения местонахождения и температуры очагов, возни-  
кающих в недоступных местах выработанного пространства, предупреж-  
дения рудничных пожаров и их тушения, в том числе в условиях опасности  
образования в атмосфере взрывчатых концентраций горючих газов и  
угольной пыли.

Предназначено для студентов специальности 280102 – «Безопасность  
технологических процессов и производств».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбас-  
ского государственного технического университета.

ISBN 978-5-89070-632-4

УДК 622.822  
ББК 33.18  
© ГУ КузГТУ, 2008  
© Портола В. А., 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЖАРАХ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	6
1.1. Опасность пожаров на горных предприятиях и причины их возникновения.....	6
1.2. Понятия воспламенения, вспышки.....	10
1.3. Режимы горения.....	12
1.4. Химические процессы при горении.....	14
2. ЭКЗОГЕННАЯ ПОЖАРООПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	16
2.1. Развитие пожара в горизонтальных выработках с горючей крепью.....	16
2.2. Особенности пожара в выработках, оборудованных ленточными конвейерами.....	22
2.3. Определение горючести шахтных материалов.....	25
2.4. Требования к огнестойкости крепи горных выработок.....	26
2.5. Пожары в промышленных зданиях и сооружениях..	29
3. ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ.....	32
3.1. Теории самовозгорания.....	32
3.2. Условия развития эндогенного пожара.....	34
3.3. Генерация тепла при окислении угля.....	38
3.4. Определение скорости окисления угля.....	40
3.5. Моделирование процесса самовозгорания.....	45
3.6. Влияние некоторых параметров на процесс самовозгорания угля.....	50
3.7. Эндогенная пожароопасность шахт.....	58
4. ОБНАРУЖЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	61
4.1. Обнаружение пожаров в зданиях и сооружениях....	61
4.2. Признаки рудничных пожаров и методы их обнаружения.....	62
4.3. Газово-аналитический метод обнаружения подземных пожаров.....	64
4.4. Физические методы обнаружения пожаров.....	67

4.5. Оценка температуры очагов самовозгорания.....	70
4.6. Определение местонахождения очагов пожара в выработанном пространстве.....	74
5. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ РУДНИЧНЫХ ПОЖАРОВ.....	76
5.1. Защита поверхностных зданий и сооружений.....	76
5.2. Снижение пожарной опасности шахтной деревянной крепи.....	85
5.3. Шахтные пожарно-оросительные сети и противопожарные двери.....	87
5.4. Первичные средства пожаротушения в шахте.....	90
5.5. Основные направления предупреждения эндогенных пожаров.....	92
5.6. Пенный способ предупреждения эндогенных пожаров в шахтах.....	95
6. ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ.....	104
6.1. Активное тушение экзогенных пожаров.....	106
6.2. Схемы активного тушения пожаров в выработках...	111
6.3. Инертизация рудничной атмосферы при тушении пожаров в горных выработках.....	115
6.4. Изоляция пожарных участков.....	118
6.5. Комбинированное тушение пожаров.....	122
6.6. Тушение подземных пожаров пеной.....	122
6.7. Тушение пожаров в шахтах, опасных по газу и пыли.....	126
6.8. Оценка опасности взрыва горючих газов при пожаре в шахте.....	128
6.9. Локализация и тушение эндогенных пожаров в выработанном пространстве.....	135
6.10. Применение заиливания, инертных газов и затопления для тушения пожаров.....	147
6.11. Контроль за эндогенными пожарами, их списание и вскрытие пожарного участка.....	150
7. ПЛАН ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ НА ШАХТАХ.....	151
8. ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЕ ДЕЛО.....	153
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	156

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие пожара сопровождается возникновением ряда опасных факторов, представляющих серьезную угрозу здоровью и жизни людей. Так, ущерб здоровью людей могут нанести пламя, дым, разогретый воздух, инфракрасное излучение, токсичные газы, образующиеся при горении, взрывы, инициируемые пожаром, разрушающиеся конструкции зданий и сооружений. Кроме того, пожары причиняют огромный материальный ущерб, способны нанести вред окружающей природной среде.

Особенно опасны пожары на горных предприятиях, добывающих горючие полезные ископаемые. Существенно осложняется тушение пожаров на угольных шахтах из-за возможности образования взрывоопасных концентраций выделяющихся горючих газов, угольной пыли. Кроме того, подземные пожары (особенно эндогенного происхождения) могут возникать в недоступных местах (в выработанном пространстве), что значительно затрудняет их своевременное обнаружение и тушение. Из-за недоступности и отсутствия данных о местонахождении очага, для тушения пожаров, возникших в выработанном пространстве, зачастую применяют метод изоляции. Тушение таких пожаров может длиться годами и сопровождаться огромным экономическим ущербом из-за утраты дорогостоящей угледобывающей техники, горных выработок, потерянного полезного ископаемого.

Борьба с пожарами на горных предприятиях, особенно в шахтах, предусматривает ряд мероприятий, включающих постоянный контроль за признаками пожара, профилактические мероприятия по предотвращению пожаров, определение местонахождения (локацию) обнаруженного очага в выработанном пространстве, его локализацию и тушение.

Специфические условия шахты требуют разработки специального оборудования и техники для обнаружения, профилактики эндогенных и экзогенных пожаров, локализации и тушения очагов, в том числе дистанционной подачей инертных газов, пены. В случае выделения метана и образования взрывчатой пыли при добыче полезного ископаемого необходимо применение способов тушения, позволяющих избежать образования и воспламенения взрывоопасных смесей в рудничной атмосфере.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЖАРАХ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

## 1.1. Опасность пожаров на горных предприятиях и причины их возникновения

*Пожаром* обычно считается неконтролируемый процесс горения, создающий угрозу здоровью и жизни людей, а также материальным ценностям. *Рудничными* называют пожары, возникшие непосредственно в горных выработках (подземных и открытых) и массиве полезного ископаемого, а также на поверхности (надшахтных зданиях, складах полезного ископаемого и т. д.), если существует опасность попадания огня или продуктов горения в горные выработки. *Подземными* являются пожары, действующие в горных выработках.

Опасными факторами пожара, угрожающими здоровью и жизни людей, являются: открытый огонь; тепловое излучение; искры; разогретый воздух; токсичные продукты горения; дым; пониженная концентрация кислорода; обрушения зданий, сооружений; падающие части строительных конструкций, оборудования. Пожары, осложненные взрывами, могут привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям. Облицовка внутренних стен жилых и административных помещений панелями из горючего материала способствует быстрому распространению огня и выделению токсичных газов, что существенно увеличило опасность пожаров.

Огромную угрозу для жизни людей представляют пожары, возникающие в шахтах. При несвоевременном вводе средств пожарной защиты в действие, а также низкой эффективности применяемых способов тушения подземные пожары превращаются в грозное бедствие. Они дезорганизуют работу предприятия, обесценивают недра, приводят в негодность оборудование. Под угрозой оказываются здоровье и жизнь шахтеров, а также горноспасателей, участвующих в ликвидации аварийной ситуации. Выделение тепла, дыма и токсичных газов в ограниченный объем горных выработок делают рудничную атмосферу непригодной для дыхания. Благодаря вентиляции продукты горения, в том числе и токсичные газы, способны быстро распространиться на значитель-

ные расстояния от очага пожара. В наклонных и вертикальных выработках под действием тепловой депрессии, развиваемой пожаром, может опрокинуться вентиляционная струя.

К разгоревшемуся пожару практически невозможно приблизиться, выгорание элементов крепи может вызвать обрушение кровли, нарушение проветривания горных выработок. В шахтах, опасных по выделению горючих газов или по пыли, возникает реальная угроза взрыва из-за высокой вероятности воспламенения взрывоопасных скоплений газа и пыли.

Пожары составляют большую часть всех видов аварий, происходящих на угольных шахтах. Например, в 2001 г. на угольных шахтах РФ произошло 40 аварий. Из них 23 – подземные пожары, 5 – взрывы газа и пыли, 1 – внезапные выбросы угля и газа, 6 – обрушение пород, 5 – другие виды аварий.

Рудничные пожары ведут к огромному экономическому ущербу, обусловленному потерей дорогостоящей угледобывающей техники, подготовленных к выемке запасов угля, горных выработок. Большие затраты приходится на работы по изоляции, локализации и тушению пожаров, а также на восстановление горных выработок после ликвидации аварии. Так, затраты на ликвидацию рудничных пожаров составляют около 90 % от затрат, необходимых на ликвидацию всех видов аварий на угольных шахтах.

Наибольшее число пожаров зафиксировано на горных предприятиях, добывающих горючие полезные ископаемые, из которых наиболее пожароопасными являются угольные шахты. На угольных разрезах также возникает много пожаров, однако они менее опасны и в большинстве случаев не регистрируются, так как появляются на породных отвалах и не представляют прямой угрозы работам по добыче угля.

По причине возникновения пожары могут быть экзогенными и эндогенными. **Экзогенные пожары** возникают от внешних источников тепла, воспламеняющих горючее вещество. **Эндогенные пожары** медленно развиваются вследствие процесса самовозгорания окисляющегося материала. **Самовозгорание** – это процесс повышения температуры за счет выделения тепла при реакции окисления горючего материала. Горючим материалом на горных предприятиях обычно являются разрыхленные массы уг-

ля, колчеданных руд. Окислителем этой массы выступает кислород, содержащийся в воздухе. Большая часть эндогенных пожаров в шахтах возникает в скоплениях угля, теряемого в выработанном пространстве. На земной поверхности самовозгораются склады угля и скопления горных пород, содержащих горючие компоненты.

Причинами теплового импульса, инициирующего возникновение экзогенных пожаров на горных предприятиях, могут быть:

- неисправное электрооборудование и кабельные сети (короткое замыкание или перегрев в токоведущих кабелях и обмотках электродвигателей, контролирующих устройствах);
- неправильное ведение взрывных работ и некачественные взрывчатые материалы (выгорание используемых взрывчатых веществ из-за неправильного заряжания скважин и шпуров, некачественно изготовленной или пришедшей в негодность взрывчатки, применение накладных зарядов);
- трение вращательных и ударных элементов горных машин и механизмов (конвейерных лент, канатов о шпалы и элементы крепи), трение в подшипниках и редукторах;
- применение открытого огня и высокотемпературных процессов (газо- и электросварка, курение и др.);
- перегрев масла в маслостанциях и гидросистемах;
- воспламенение метана в очаге самовозгорания, возникшего в выработанном пространстве, и передача пламени в атмосферу горной выработки;
- трение горных пород при деформации и разрушении.

Динамика подземных пожаров, возникающих на угольных шахтах России, приведена в табл. 1.1. Из представленных данных видно, что число подземных пожаров на шахтах снижалось в 1995–1999 гг., затем их число стабилизировалось, а в 2004–2005 гг. вновь уменьшилось. Сокращению числа пожаров способствовала происходящая реструктуризация угольной промышленности, включающая закрытие нерентабельных предприятий, а также шахт с высоким уровнем аварийности.

Таблица 1.1

Динамика подземных пожаров на шахтах России

Год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Число подземных пожаров	67	56	57	38	32	27	23	25	28	14	12
Число эндогенных пожаров	29	37	17	22	13	10	11	10	14	11	3
Число экзогенных пожаров	38	19	40	16	19	17	12	15	14	3	9
Доля эндогенных пожаров, %	43	66	30	58	40	37	48	40	50	78	25

В последние годы на угольных шахтах России сложилось приблизительное равенство пожаров, имеющих экзогенное и эндогенное происхождение.

Все горные предприятия (шахты, рудники, разрезы, обогатительные фабрики) содержат в большом количестве различные горючие материалы, которые могут стать объектом пожара в результате небрежности, неправильного ведения работ. В подземных выработках горение даже незначительного количества горючего вещества может вызвать отравление или гибель многих людей.

Объектом горения на горных предприятиях прежде всего может быть добываемое или перерабатываемое полезное ископаемое. В наибольшей степени подвержены горению добываемые бурые и каменные угли, торф, углистые сланцы, сернистые и серные руды и другие полезные ископаемые. К наиболее распространенным горючим материалам, используемым в шахтах, относятся крепежный лес (стойки, верхняки, распорки, затяжки в кровле и боках и пр.), деревянные перемычки, перегородки, двери, лестницы, шпалы, трапы, настилы, а также образующиеся отходы древесины (кора, стружки, опилки). Крепь может гореть независимо от ее состояния (мокрая, сухая) в действующих выра-

ботках и в заложенном или обрушенном пространстве. От соприкосновения с горячей крепью легко воспламеняется угольная мелочь или сульфидные руды.

К горючим материалам относится изоляция электропроводов, электрооборудования и силовых кабелей. Причиной их воспламенения обычно является короткое замыкание или другие высокотемпературные источники. Легко воспламеняются выделяющиеся в шахтах горючие газы и пыль. Причиной возникновения и распространения пожара могут быть используемые горючие жидкости (бензин, керосин, нефть) и минеральные масла.

В последнее время отмечается много случаев загорания конвейерных лент от трения резиновой ленты о ролики или барабан при их пробуксовке. Причиной пробуксовки обычно является заштыбовка конвейера или его перегрузка. Объектом горения могут быть вентиляционные трубы, обтирочные материалы, старая промасленная спецодежда и др.

На поверхности горных предприятий часто горят складированные горючие ископаемые, породные отвалы, содержащие горючие компоненты. В качестве окислителя в процессе горения обычно выступает атмосферный кислород. Некоторые вещества окисляются хлором, фтором, бромом, серой, диоксидом углерода, оксидами азота и др.

## **1.2. Понятия воспламенения, вспышки**

Наличие внешнего теплового импульса приводит к нагреву горючего вещества, которое сопровождается выделением горючих газов или паров вследствие его испарения или разложения на жидкие и газообразные компоненты. В определенный момент внешний источник огня может вызвать вспышку или воспламенение горючего вещества.

**Вспышка** – это мгновенное сгорание паров жидкости или твердого вещества, а также выделяющихся газов от источника зажигания (горящего или раскаленного тела, электрического разряда и пр.) при скорости их образования или выделения, недостаточной для поддержания процесса горения. Минимальная температура, при которой над поверхностью горючего вещества обра-

зуются пары и газы, способные вспыхивать от открытого источника зажигания, называется **температурой вспышки**.

В зависимости от температуры вспышки горючие жидкости разделяются по пожароопасности на два класса:

1 – легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки до 61 °С (бензин, этиловый спирт, ацетон, нитроэмали и др.). Среди этого класса можно выделить: особо опасные с температурой вспышки менее 13 °С (бензин, бензол), постоянно опасные с температурой вспышки от 13 до 27 °С (метилловый и этиловый спирты) и опасные с температурой вспышки от 27 до 61 °С (керосин);

2 – горючие жидкости с температурой вспышки более 61 °С (масло, мазут, смолы и др.).

**Воспламенение** – это начало выделения горючих паров и газов из вещества в количестве, достаточном для поддержания процесса горения после удаления источника огня. Количественно этот процесс характеризуется температурой воспламенения. Температура воспламенения больше температуры вспышки для данного горючего вещества.

**Температура самовоспламенения** – минимальная температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающееся пламенным горением.

Смеси горючих газов, паров и пыли с окислителем способны гореть только при определенном соотношении в них горючих веществ. Минимальную концентрацию горючего вещества, при котором оно способно загораться и распространять пламя, называют **нижним концентрационным пределом воспламенения**. Наибольшую концентрацию, при которой еще возможно горение, называют **верхним концентрационным пределом воспламенения**. Область концентраций между названными пределами представляет собой **область воспламенения**. Концентрационные пределы воспламенения не постоянны и зависят от ряда факторов (мощность источника воспламенения, температура и давление горючей смеси).

Так, для бензина (А-66) температура вспышки равна 39 °С, температура самовоспламенения 255 °С, нижний концентрационный предел воспламенения 0,76 % по объему, верхний концен-

традиционный предел воспламенения 5,0 % по объему. Керосин (КО-20) имеет температуру вспышки 55 °С, температуру самовоспламенения 227 °С, нижний концентрационный предел воспламенения 0,6 % по объему. Для мазута топочного температура вспышки равна 140 °С, температура самовоспламенения 380 °С.

### 1.3. Режимы горения

*Горение* – это процесс быстрого окисления вещества с выделением света и значительного количества тепла, позволяющего поддерживать температуру процесса на необходимом уровне (не ниже температуры возгорания или воспламенения).

Горение возможно только при наличии горючего вещества и окислителя. Горючие вещества могут находиться в твердом, жидком и газообразном состоянии. Окислитель, которым обычно является кислород воздуха, находится в газообразном состоянии. В зависимости от агрегатного состояния горючего вещества горение может быть *гомогенным* (компоненты горючей смеси, как и окислителя, находятся в газообразном состоянии) и *гетерогенным* (горючее вещество находится в твердом или жидком состоянии и из-за различных агрегатных состояний существует раздел фаз горючего вещества и окислителя).

Скорость реакции соединения окисляющегося материала с кислородом возрастает при повышении температуры, переходя при критических значениях в качественно новое состояние (вспышка, воспламенение, взрыв, детонация). Наличие пламени свидетельствует о выделении из твердого или жидкого вещества газообразных горючих компонентов, реакция взаимодействия которых с окислителем происходит на некотором расстоянии от поверхности горящего материала и сопровождается интенсивным выделением тепла и света.

В большинстве твердых веществ образование летучих горючих компонентов происходит в результате разложения (пиролиза), скорость которого зависит от физико-химических свойств вещества и количества тепла, поступающего к его поверхности от зоны горения. При горении жидкости выделение летучих компонентов происходит обычно за счет испарения.

Различают два режима горения: *диффузионное* и *кинетическое*. При пожарах обычно происходит диффузионное горение, которое характеризуется тем, что горючий компонент и окислитель вначале разделены и горение происходит в зоне их перемешивания. Поэтому скорость горения зависит только от скорости поступления реагирующих веществ в зону их взаимодействия.

Кинетическое горение происходит в случае, когда горючее вещество и окислитель образовали однородную смесь до начала воспламенения. Скорость горения в данном случае лимитируется только скоростью химических реакций. Так, кинетическое горение происходит в смеси горючего газа и воздуха.

По скорости распространения пламени горение может быть *дефлаграционным* (порядка десятка метров в секунду), *взрывным* (порядка сотни метров в секунду) и *детонационным* (тысячи метров в секунду).

Возникновение горения связано с обязательным самоускорением реакции в системе. Существует три основных вида самоускорения химических реакций при горении: *тепловой*, *цепной* и комбинированный – *цепочно-тепловой*.

Тепловой механизм связан с возрастанием скорости химических реакций с повышением температуры и определяется уравнением Аррениуса:

$$K = K_0 e^{-E/RT}, \quad (1.1)$$

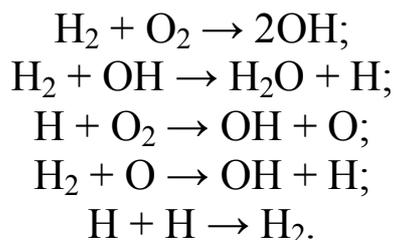
где  $K_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Энергия активации представляет собой минимальную энергию, которой должны обладать сталкивающиеся между собой молекулы, чтобы преодолеть потенциальный барьер и вступить между собой в реакцию. Чем больше энергия активации химической реакции, тем медленнее она идет. С увеличением температуры растет число молекул, обладающих необходимой энергией, и скорость реакции возрастает.

Цепное ускорение реакций окисления связано с катализом химических превращений, осуществляемым промежуточными продуктами превращений, обладающими особой химической активностью и называемыми активными центрами. В соответствии

с цепной теорией химический процесс происходит не путем непосредственного взаимодействия исходных молекул, а с помощью осколков, образующихся при распаде этих молекул (радикалы, атомарные частицы).

Так, взаимодействие водорода и кислорода сопровождается образованием следующих радикалов, резко ускоряющих процесс горения и приводящих к взрыву:



Реальные процессы горения осуществляются, как правило, по комбинированному цепочно-тепловому механизму.

По способности материалов самостоятельно гореть в среде воздуха нормального состава их разделяют на следующие категории:

- 1 – негорючие (не способные к горению);
- 2 – трудногорючие (способные гореть под воздействием источника зажигания, но не способные к самостоятельному горению после его удаления);
- 3 – трудновоспламеняющиеся (способные воспламеняться только под действием мощного источника зажигания);
- 4 – горючие (способные самостоятельно гореть после удаления источника зажигания);
- 5 – легковоспламеняющиеся (способные воспламеняться от кратковременного воздействия источника зажигания с низкой энергией – искры, пламени спички).

#### 1.4. Химические процессы при горении

Углерод является основной частью органической массы угля, древесины и других горючих материалов, находящихся на горных предприятиях. Поэтому углерод становится основным источником тепла в процессе пожара и создает условия для развития других стадий процесса. В очаге пожара могут происходить следующие реакции.

Взаимодействие кислорода с углеродом с выделением тепла может происходить с образованием углекислого газа и оксида углерода:



Углерод может взаимодействовать с углекислым газом с поглощением тепла:



Происходит также сгорание оксида углерода с выделением тепла:



Поэтому, несмотря на различные условия возникновения и развития пожара, обязательными продуктами процесса горения будут углекислый газ и оксид углерода. Однако при недостатке кислорода содержание оксида углерода в продуктах горения может резко увеличиться.

При высоких температурах (1 200–1 300 °С) происходит следующая эндотермическая реакция разложения водяного пара при взаимодействии с углеродом:

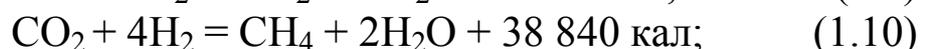
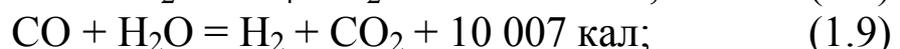
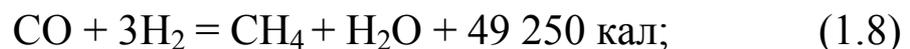


В случае меньшей температуры (400–700 °С) разложение водяного пара с поглощением тепла протекает по реакции



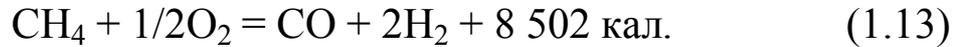
В этом процессе может выделяться большое количество водорода.

В результате экзотермических реакций взаимодействия углерода, водяного пара и продуктов его разложения при отсутствии кислорода происходит образование метана, водорода:



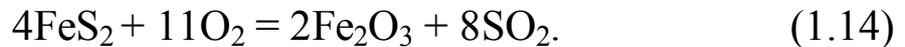
Эти реакции наиболее легко протекают при температуре 300–800 °С.

Горение метана может происходить следующим образом:



Из формул видно, что один объем метана сжигает весь кислород в десяти объемах воздуха с образованием углекислого газа и паров воды. При сгорании метана в условиях недостатка кислорода образуется оксид углерода и водород.

Выделение тепла происходит и при окислении пирита, содержащегося в угле:



Во влажной среде происходит реакция окисления пирита с образованием серной кислоты, бурно реагирующей с некоторыми горными породами с выделением тепла:



Большинство приведенных реакций может происходить одновременно. В состав пожарных газов входит CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O.

## **2. ЭКЗОГЕННАЯ ПОЖАРООПАСНОСТЬ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

### **2.1. Развитие пожара в горизонтальных выработках с горючей крепью**

Интенсивность развития пожара в горных выработках зависит от вида крепи, влажности ее горючих элементов, сечения горной выработки, скорости движения воздушной струи. Существенно сказывается на скорости развития пожара величина первичного теплового импульса. По мере развития пожара происходит его перемещение по поверхности горных выработок. При достижении температуры пожара в выработке максимальных значений (1000–1400 °С) устанавливается определенная скорость перемещения огня, величина которой зависит только от скорости

движения вентиляционной струи и загрузки выработки горючим материалом.

Пожар в горной выработке с горючей крепью (рис. 2.1) имеет следующую структуру: 0 – участок выгоревшей крепи; 1 – зона горения, перемещающаяся в направлении движения вентиляционной струи и состоящая из участка древесного угля, в котором отсутствует пламенное горение, и участка интенсивного пламенного горения; 1<sub>1</sub> – зона горения, перемещающаяся навстречу вентиляционному потоку; 2 – зона термической подготовки древесины; 3 – зона подсушки древесины.

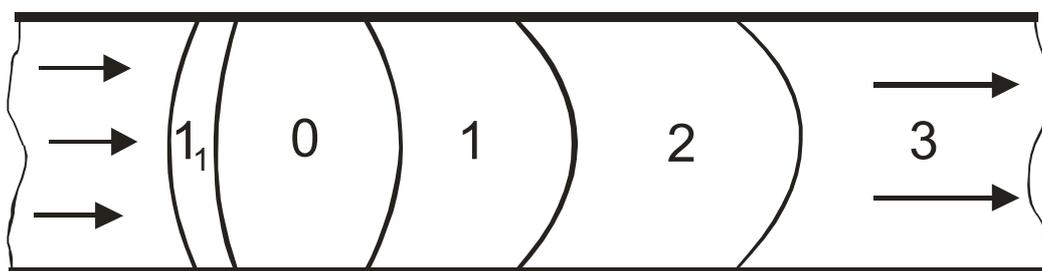


Рис. 2.1. Структура пожара в горной выработке

Таким образом, вентиляционный поток при движении по горячей выработке прежде всего нагревается породами на участке выгоревшей крепи. Затем нагрев продолжается в зоне древесного угля, а часть кислорода расходуется на реакцию с углем. На участке пламенного горения происходит резкое снижение содержания кислорода (до 0–1 %) и отмечается максимальная температура (до 1 430 °С). Обедненный кислородом разогретый воздух и образовавшиеся газы перемещаются дальше по выработке и охлаждаются, отдавая тепло на подсушку и термическую подготовку древесины.

Основными параметрами, характеризующими подземный пожар, являются: температура газового потока, окружающих горных пород и горючего материала, концентрация газов в районе пожара, протяженность высоких температур и скорость перемещения очага пожара. Динамика изменения температуры на экспериментальном пожарном участке, закрепленном деревянной крепью влажностью 15,5 % при скорости движения свежего воздуха 2 м/с, приведена на рис. 2.2.

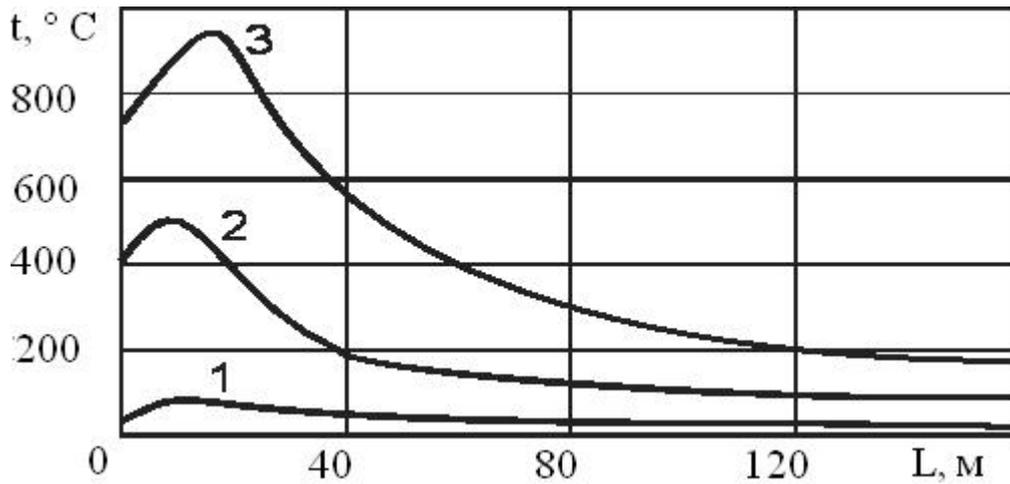


Рис. 2.2. Изменение температуры газов при пожаре по длине горной выработки после поджигания: 1 – через 18 мин; 2 – через 32 мин; 3 – через 42 мин

Поперечное сечение участка горной выработки до установки крепи равнялось  $4,2 \text{ м}^2$ , после установки –  $3 \text{ м}^2$ . Импульсный костер располагался у боковой стены. К 18 мин огонь прорвался к кровле, к 22 мин огнем было охвачено  $8\text{--}10 \text{ м}^2$  поверхности выработки. К 30 мин выработка загорелась по всему периметру. Резко повысилась интенсивность нарастания температуры отходящих от очага пожарных газов (с 8 до  $90 \text{ °C/мин}$ ). К 46 мин, когда пожар распространился на весь закрепленный участок штольни, температура пожарных газов достигла максимального значения ( $1\ 050 \text{ °C}$ ).

В начальный период, при небольшой температуре очага и низкой температуре стенок выработки, охлаждение газового потока происходило быстро. Так, к 30 мин при температуре очага  $470 \text{ °C}$  на расстоянии 50 м зафиксировано ее снижение до  $110 \text{ °C}$ , а при дальнейшем развитии пожара область распространения высоких температур резко увеличивается.

Эксперименты показали, что скорость повышения температуры при пожаре в горной выработке с деревянной крепью в значительной степени зависит от влажности дерева и скорости движения воздуха. Полное развитие пожара, характеризуемое достижением температуры около  $1\ 000 \text{ °C}$  и перемещением очага по выработке с постоянной скоростью, происходит за время от 20 до 100 мин (рис. 2.3).

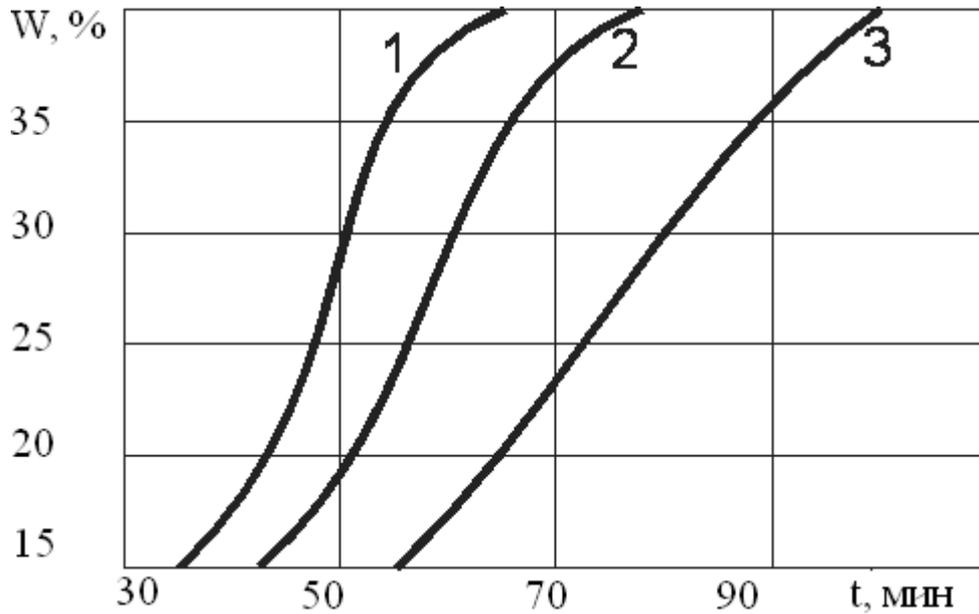


Рис. 2.3. Время полного развития пожара в выработке в зависимости от влажности крепи и скорости движения воздуха: 1 – 3 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 1 м/с

Опасность подземных пожаров в значительной степени зависит от интенсивности генерации в очаге ядовитых и удушливых газов, а также скорости поглощения кислорода в воздухе. На рис. 2.4 показано изменение состава пожарных газов в зависимости от температуры очага пожара в период разгорания. Наиболее быстро снижение концентрации кислорода происходит в интервале 400–800 °С, а при 1 200 °С падает до 0. Повышение температуры пожара резко увеличивает содержание углекислого газа. Окись углерода появляется при температуре 80–100 °С, и ее концентрация резко возрастает при нагреве до 500–1 000 °С, достигая 7 %. Концентрация метана по мере повышения температуры газового потока также увеличивается до 2 %.

Для развития пожара в горной выработке, закрепленной комбинированной крепью (железобетонные стойки с металлическими верхняками и деревянными затяжками), потребовался значительно больший начальный тепловой импульс. В экспериментах было отмечено медленное развитие пожара и необходимость большего теплового импульса из-за больших потерь тепла вследствие высокой теплоемкости и теплопроводности железобетонной и металлической крепи, а также механического прерывания

пламени негорючими стойками. С повышением влажности деревянных затяжек также требуется увеличение импульса костра из-за расхода тепла на нагрев и испарение свободной воды, содержащейся в древесине, а также коллоидно связанной с веществами древесины.

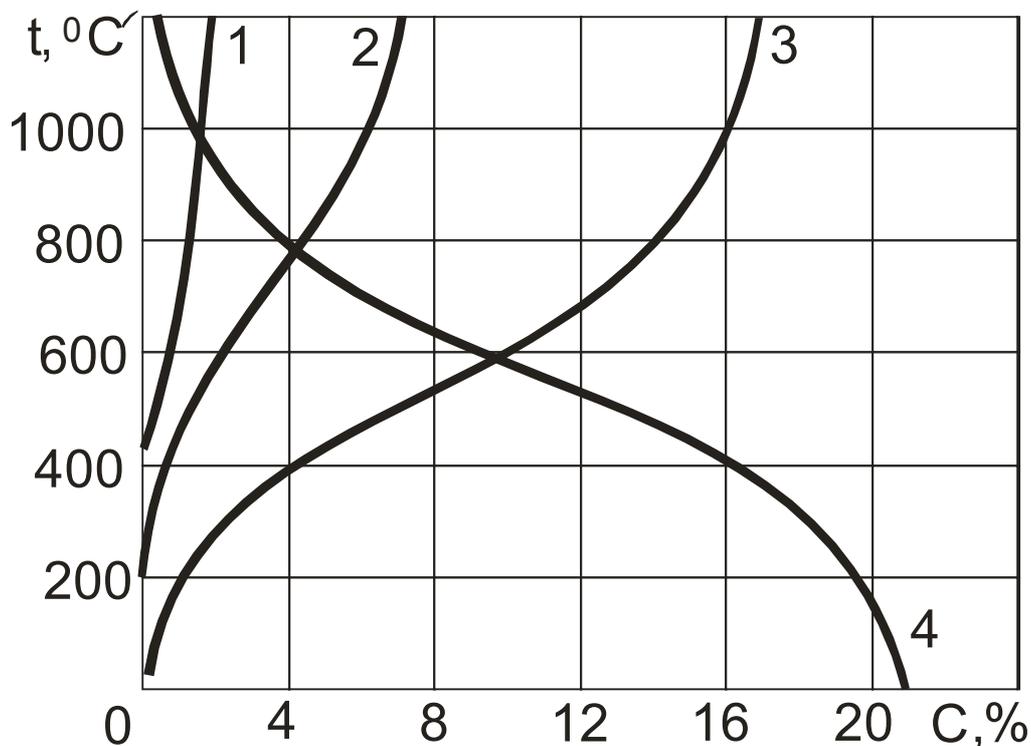


Рис. 2.4. Содержание газов в продуктах горения в зависимости от температуры очага: 1 – метан; 2 – оксид углерода; 3 – углекислый газ; 4 – кислород

Огневые опыты проводились при скорости проветривания 2 м/с и с деревянными затяжками влажностью 18,6 %. По результатам замеров следует, что к 30 мин затяжки загорелись на площади 10–12 м<sup>2</sup>, к 42 мин огонь распространился по периметру выработки, однако пламя оказалось заблокированным между двумя железобетонными стойками. Горение стенок началось только после поджигания их снизу многочисленными кострами, образовавшимися на почве от падающих обгоревших затяжек.

Динамика изменения температуры вентиляционного потока (рис. 2.5) показывает, что температура газов при таком горении намного ниже, чем в первом опыте. Это обстоятельство объясняется сравнительно малой удельной загрузкой горючим материа-

лом выработки с комбинированной крепью (100–120 кг древесины на 1 м по сравнению с 200–220 кг для деревянной крепи). Недостаток горючего материала привел к снижению концентрации кислорода только до 13,6 %. Более интенсивно пожар развивался в выработке, закрепленной металлическим спецпрофилем с деревянной затяжкой.

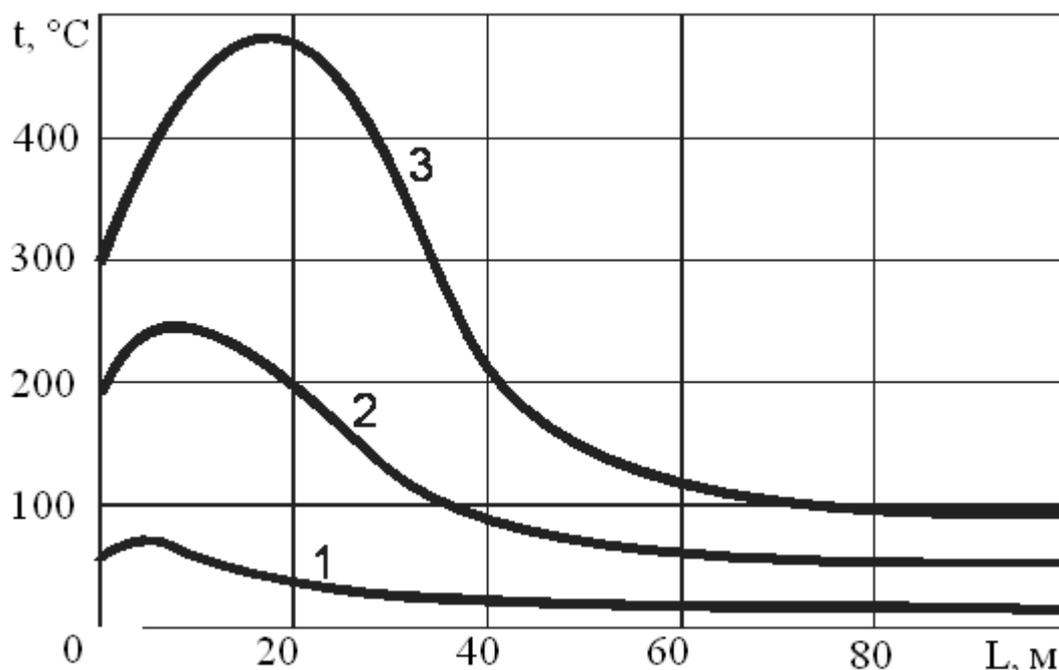


Рис. 2.5. Температура пожарных газов по длине выработки с комбинированной крепью: 1 – через 15 мин; 2 – через 42 мин; 3 – через 60 мин

Анализ динамики развития пожара в горной выработке с комбинированной крепью, имеющей влажную затяжку (30–33 %), показал, что при появлении в выработке мощного теплового импульса периоду полного развития пожара предшествует длительная подготовка древесины к воспламенению. При этом скорость нарастания температуры потока пожарных газов в период подготовки древесины (95 мин) составляет около 0,5 °C/мин, а за период интенсивного разгорания (30 мин) возрастает до 32 °C/мин. Динамика развития пожара показывает, что охлаждение потока пожарных газов до температуры 300 °C (при которой возможно самовоспламенение горючих материалов с образованием вторичных очагов) происходит лишь на расстоянии 50–100 м от перед-

него фронта пламени. Поэтому устройство огнестойких зон нецелесообразно, так как они должны быть длиной более 100 м.

Таким образом, из приведенных данных видно, что пожар в горной выработке, пройденной по породе и содержащей крепь с элементами древесины, сравнительно быстро развивается. В случае если выработка пройдена по пласту угля, температура в очаге пожара может достичь более высоких значений и распространиться на большие расстояния. Аналогичные процессы развития пожара будут происходить и в горной выработке, не содержащей элементы древесины. При возникновении подземных пожаров в составе рудничной атмосферы начинает снижаться содержание кислорода и увеличивается концентрация оксида углерода (до нескольких процентов) и углекислого газа.

Пожар в горных выработках может распространяться как по ходу, так и навстречу вентиляционной струе. При сечении горной выработки 6–12 м<sup>2</sup> и скорости воздуха менее 1,7 м/с пожар движется навстречу струе, а при большей скорости по ходу движения воздуха. На пути движения раскаленных пожарных газов из-за отсутствия кислорода происходит коксование и возгонка угля и других горючих материалов. С повышением температуры очага усиливается тепловая депрессия, направленная вертикально вверх и способная опрокинуть вентиляционную струю.

## **2.2. Особенности пожара в выработках, оборудованных ленточными конвейерами**

Пожары, возникающие на ленточных конвейерах, распространяются особенно быстро. При этом опасность усугубляется тем, что при горении и термическом разложении лент выделяются токсичные газообразные продукты (фосген, цианистый водород, окислы азота и др.), в количествах, опасных для людей.

В лабораторных условиях была определена пожароопасность различных типов конвейерных лент. Поливинилхлоридная лента (трудногораемая, коэффициент горючести 0,49) длиной 20 м испытывалась при скорости фильтрации воздуха 1 и 3 м/с. В первом опыте лента вспыхнула через 10 мин после ее поджигания. Медленное горение, со значительным дымообразованием, продолжалось 15 мин, температура исходящих газов достигла

240 °С. Однако затем огонь стал быстро распространяться по прогретой ленте, и к 24 мин температура достигла 700 °С. Концентрация кислорода в отходящих газах составила 6 %.

Во втором опыте (скорость воздуха 3 м/с) из-за значительного охлаждения вентиляционной струей лента вспыхнула только через 15 мин после ее поджигания. Однако затем интенсивность горения резко увеличилась, и общее время сгорания отрезка уменьшилось на 7 мин. Температура газов достигла 800 °С, и произошло снижение концентрации кислорода до 4,5 %.

Огневые испытания резиноклассовых лент длиной 14,4 м, проведенные при скорости проветривания 2 и 2,5 м/с, показали, что лента вспыхнула через 6 мин после поджигания и к 8 мин горения температура на пожарном участке достигла 940 °С. Концентрация кислорода при этом снизилась до 2,8 %. Обработка данных позволила установить закономерность изменения скорости распространения пламени по ленте (рис. 2.6).

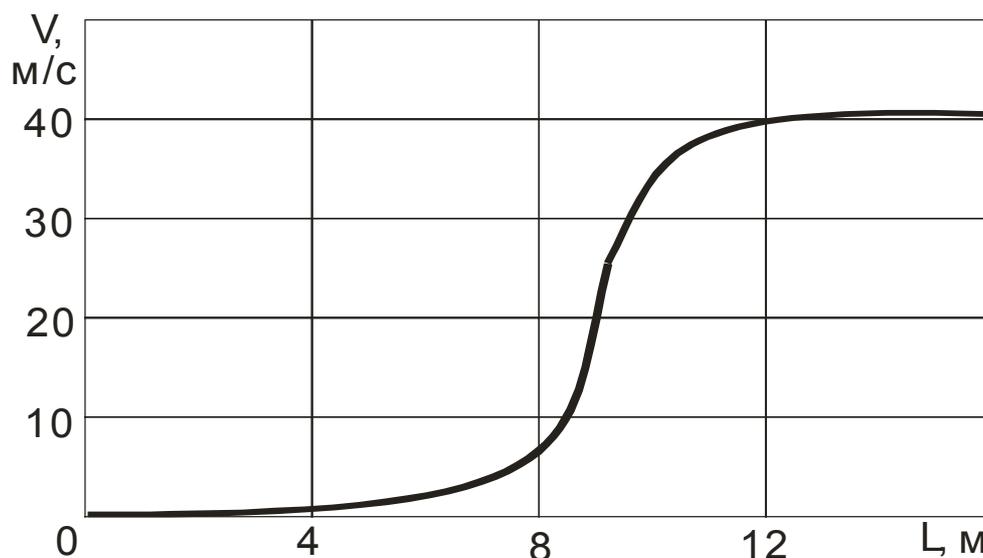


Рис. 2.6. Изменение скорости распространения пламени по длине конвейерной ленты

Так, по мере распространения огня на расстояние до 7 м скорость перемещения пламени не превышала 3 м/мин, а после прогрева ленты достигла 40 м/мин и стабилизировалась, что объясняется недостатком кислорода на пожарном участке. Расчеты показывают, что при горении более протяженных конвейерных

лент в условиях шахты эта скорость постепенно снижается и не превышает 20–25 м/мин при скорости воздуха 2–2,5 м/с.

Одним из источников воспламенения конвейерных лент является пробуксовка приводных барабанов. Определить температуру приводного барабана при его пробуксовке можно из уравнения теплового баланса

$$Q_0 = Q_L + Q_V, \quad (2.1)$$

где  $Q_0$  – количество тепла, выделившегося при пробуксовке ленты, ккал;  $Q_L$  – количество тепла, отданное на нагревание системы барабан – лента, ккал;  $Q_V$  – количество тепла, отданное окружающему воздуху, ккал.

Результаты расчета показывают (рис. 2.7), что при пробуксовке на барабане происходит быстрый нагрев ленты, способный привести к пожару. Эксперименты и результаты исследований случаев загораний в шахтах показали: для возникновения пожара в процессе трения резиновой ленты о ролики или приводной барабан при пробуксовке достаточно от 10 мин до 2 ч.

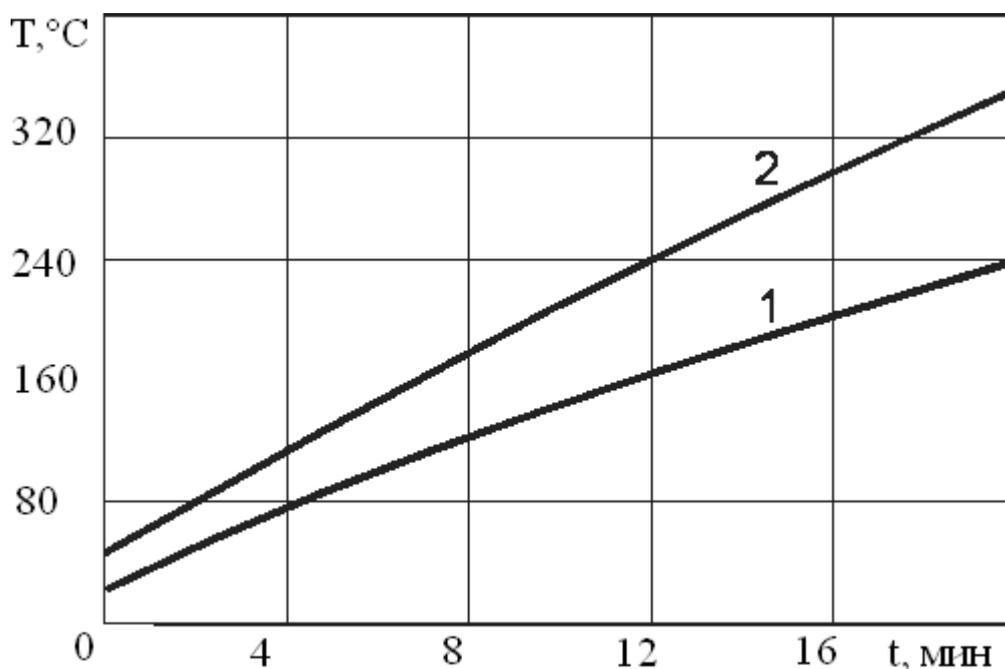


Рис. 2.7. Зависимость температуры нагрева приводного барабана при полной пробуксовке от времени вращения: 1 – при скорости вращения 1 м/с; 2 – при скорости вращения 3 м/с

### 2.3. Определение горючести шахтных материалов

Для определения горючести изделий из резинотехнических или синтетических материалов (вентиляционных труб, футеровок приводных барабанов и амортизирующих роликов и пр.) применяется метод огневой трубы. Горючесть конвейерных лент и гибких кабелей определяется с помощью методов, предусмотренных техническими условиями на эти изделия. Установка для определения горючести тонкостенных резинотехнических и синтетических материалов (рис. 2.8) представляет трубу диаметром 50 мм и длиной 165 мм.

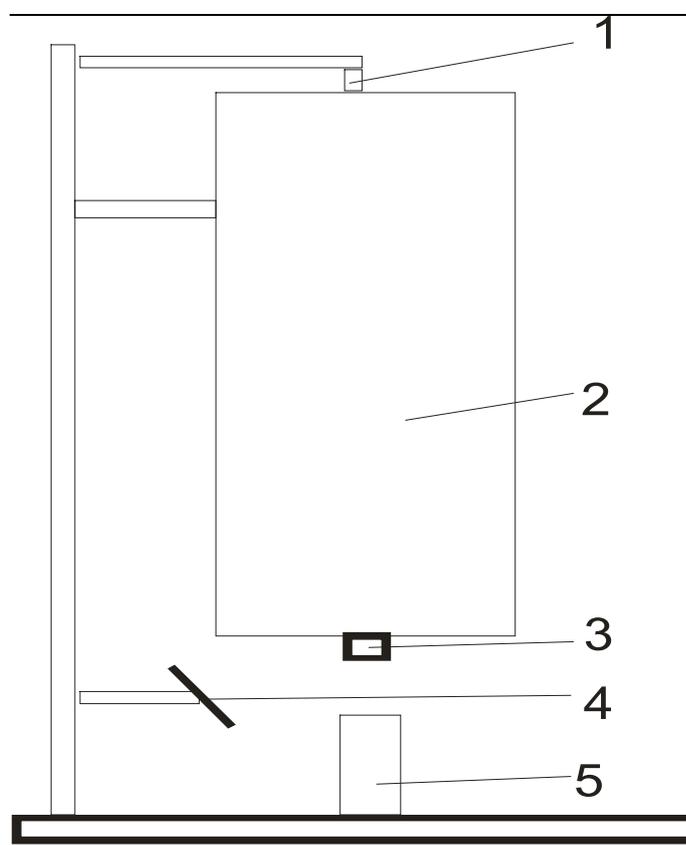


Рис. 2.8. Установка для определения степени горючести материалов: 1 – стержень для крепления образца; 2 – труба; 3 – образец; 4 – зеркало; 5 – горелка

Источником зажигания является газовая или спиртовая горелка. Из испытуемого материала вырезают шесть образцов размером  $10 \times 35 \times 150$  мм, выдерживают их в сушильном шкафу 2 ч при температуре  $60\text{--}70$  °С и взвешивают. Образец подвешивают

по оси трубы и подвергают действию пламени горелки до момента воспламенения. Максимальное время горения газовой горелки 2 мин, а спиртовой 2,5 мин. Остывшие образцы взвешивают. Образцы с временем самостоятельного горения или тления 60 с и более, а также потерей массы более 20 % являются горючими и к применению в шахте не допускаются. Изделие бракуется, если два и более образца из шести не выдержали испытания.

Для определения горючести конвейерных лент берут шесть образцов размером 25×200 мм. Источником зажигания являются спиртовая или газовая горелка, температура которых регулируется из условия плавления медной проволоки диаметром 0,7 мм на 6-й секунде. Испытания проводят в помещении или в вытяжном шкафу при выключенной вентиляции. Образец устанавливают так, чтобы его ось составляла 45° с вертикальной осью горелки, а его нижний край был на расстоянии 50 мм от верхнего края горелки. Время воздействия пламени на образец составляет 45 с. После удаления пламени фиксируется продолжительность самостоятельного горения образца. Лента является негорючей, если суммарная продолжительность самостоятельного горения шести образцов не превышает 45 с, а продолжительность горения одного образца не превышает 15 с.

Определение горючести гибких кабелей проводят в вытяжном шкафу при выключенной вентиляции. От каждого барабана или бухты кабеля отрезают по одному образцу длиной 300 мм. Образцы по очереди вводят в пламя паяльной лампы с объемом бака 0,5 л. Длина пламени должна быть 100 мм, время нахождения образца в пламени 3 мин. После удаления пламени горение образца, находящегося в горизонтальном положении, должно прекратиться за 1 мин. В этом случае кабель считается негорючим.

#### **2.4. Требования к огнестойкости крепи горных выработок**

Одной из эффективных мер, обеспечивающих противопожарную защиту шахт, является крепление наиболее ответственных горных выработок и камер несгораемым и трудносгораемым материалом. Для оценки крепежного материала введено понятие огнестойкости, включающее в себя группу сгораемости и предел

огнестойкости. Это позволило определить возможность воспламенения шахтной крепи в потоке раскаленных пожарных газов и время, в течение которого прогревшаяся шахтная крепь не теряет своей несущей способности и устойчивости.

Шахтная крепь, возведенная из несгораемых материалов (монолитного железобетона, кирпича, железобетонных стоек с железобетонными затяжками и пр.), неодинаково ведет себя при пожаре. Так, монолитный бетон на пожарных участках может давать трещины с образованием заколов, кирпич в своде и стенках при воздействии высокой температуры начинает отслаиваться, что требует последующего перекрепления горной выработки. Несгораемая крепь из железобетонных стоек или металлических сегментов с железобетонными затяжками не предохраняет от завалов выработки, по которым длительное время проходят пожарные газы. Поэтому при разработке требований к шахтной крепи не следует отождествлять два неравнозначных понятия – несгораемость и огнестойкость.

В зависимости от места установки в шахте различаются три степени огнестойкости крепи: высшая, средняя и минимальная. Для характеристики горючести элементов крепи (стойки, верхняки) последние делят на негорючие, трудногорючие и горючие. К негорючим отнесены металлы и все естественные и искусственные неорганические минеральные материалы, которые под воздействием огня и высокой температуры не воспламеняются, не тлеют и не обугливаются. Трудногорючие материалы с трудом воспламеняются, тлеют и обугливаются только при наличии огня. Горючие материалы самостоятельно горят после удаления источника поджигания.

Так, высшую степень огнестойкости должны иметь:

- устья всех вертикальных и наклонных стволов, штолен, устья шурфов, подающих в шахту свежий воздух, на протяжении 10 м от поверхности;

- вертикальные стволы проектируемых шахт, сопряжения вертикальных и наклонных стволов, штолен и шурфов, подающих свежий воздух, с выработками горизонтов околоствольных дворов и некоторых других.

В качестве материала крепи в таких выработках используются монолитный бетон или железобетон; каменная крепь; сме-

шанная крепь – стенки каменные, перекрытие – металлические балки с бетонными сводами; железобетонные или металлические тубинги.

Высшую степень огнестойкости должны иметь выработки:

- наклонные стволы и штольни, подающие свежий воздух в шахту;

- сопряжения выработок околоствольных дворов сланцевых шахт;

- главные квершлагги, главные откаточные и групповые откаточные штреки;

- выработки околоствольных дворов (для проектируемых шахт);

- электромашинные камеры, камеры подстанций и распределительные пункты высокого напряжения, центральные подземные электроподстанции, преобразовательные подстанции и склады взрывчатых материалов (ВМ) со сроком службы более года, электромашинные камеры со сроком службы более года и др.

Эти выработки должны иметь негорючую крепь с негорючими затяжками (железобетонные стойки с железобетонными или металлическими верхняками; металлический спецпрофиль с железобетонными или металлическими затяжками; сборный железобетон, бетон).

Среднюю степень огнестойкости имеют:

- выработки, оборудованные ленточными конвейерами, кроме штреков, примыкающих к очистным забоям, со сроком службы менее 2 лет;

- капитальные уклоны, бремсберги и ходки при них;

- вентиляционные наклонные стволы.

Стойки и верхняки крепления таких выработок должны быть негорючими, а затяжки – трудногорючими (металлический спецпрофиль с пластмассовыми или деревянными затяжками, обработанными огнезащитными составами, анкерная крепь).

Минимальную степень огнестойкости имеют:

- электромашинные камеры со сроком службы до года, не имеющие электрооборудования с масляным заполнением или имеющие электрооборудование в исполнении РВ, но с масляным заполнением отдельных узлов.

В качестве крепи используются трудногорючие стойки, верхняки и затяжки (деревянная крепь, обработанная огнезащитными составами или с огнестойкими покрытиями).

## **2.5. Пожары в промышленных зданиях и сооружениях**

Возникновение пожаров на предприятиях чаще всего происходит в следующих случаях:

- курение в не отведенных для этого местах;
- промывка деталей и других предметов легковоспламеняющимися жидкостями;
- сварка или пайка непромытой емкости из-под легковоспламеняющихся и горючих жидкостей;
- неправильная транспортировка и хранение легковоспламеняющихся веществ;
- применение нестандартных или не соответствующих номинальному току электропредохранителей;
- неисправная электропроводка;
- работа в промасленной спецодежде;
- работа с открытым огнем вблизи легковоспламеняющихся веществ.

В случае возникновения очага пожара происходит интенсивное распространение тепла в окружающее пространство за счет теплопроводности, конвективными потоками газа, а также излучения. Прогрев окружающих очаг поверхностей горючих материалов приводит к быстрому разрастанию зоны горения. В некоторых случаях, за счет неравномерного коэффициента теплоотдачи от разогретых газов, возможно появление новых очагов на некотором расстоянии от основного очага пожара. В этом случае развивается многоочаговый пожар, подавление которого особенно затруднено, так как тушение одного очага может способствовать быстрому разрастанию других очагов.

По масштабам и интенсивности пожары в зданиях и сооружениях подразделяются:

- на отдельные;
- сплошные (горит более 50 % зданий и сооружений на определенном участке застройки);

– огневой шторм (форма распространения сплошного пожара при ветре со скоростью 50 км/ч);

– массовые (при наличии отдельных и сплошных пожаров).

**Класс пожара** определяется видом горючих веществ и материалов. Все пожары подразделяются на пять классов:

класс **A** – пожары твердых веществ, в основном органического происхождения, горение которых сопровождается тлением (древесина, текстиль, бумага);

класс **B** – пожары горючих жидкостей или плавящихся твердых веществ;

класс **C** – пожары газов;

класс **D** – пожары металлов и их сплавов;

класс **E** – пожары, связанные с горением электроустановок.

**Огнестойкостью** узлов и конструкций зданий и сооружений называется их способность сохранять прочность в условиях высоких температур при пожаре, выполнять свои эксплуатационные и теплоизолирующие функции. Предел огнестойкости негорючих строительных конструкций – это время (в часах), необходимое для потери ими несущей или теплоизолирующей способностей или образования в них сквозных отверстий, через которые проникают продукты горения или пламя. Потеря теплоизолирующих способностей конструкций определяется повышением температуры на их необогреваемой поверхности в среднем более чем на 140 °С или в любой точке этой поверхности более чем на 180 °С в сравнении с температурой конструкции до испытания или прогрев конструкции более чем на 220 °С независимо от первоначальной температуры конструкции.

По степени огнестойкости строительные конструкции делят на восемь групп (I, II, III, IIIa, IIIб, IV, IVa, V). Требуемый (минимальный) предел огнестойкости строительных конструкций в зависимости от степени огнестойкости (в часах) приведен в табл. 2.1 (Примечание: нн – не нормируются).

Повышение предела огнестойкости железобетонных изделий достигается путем увеличения их толщины, подбором вяжущих и заполнителей бетона, нанесением штукатурок, облицовок и др. Предел огнестойкости металлических конструкций ограничивается минутами (0,1–0,3 ч) из-за большого коэффициента теплопроводности металлов. Увеличение огнестойкости металличе-

ских конструкций производят путем нанесения различных покрытий, имеющих небольшой коэффициент теплопроводности.

Таблица 2.1

Минимальные пределы огнестойкости по степени  
огнестойкости зданий

Наименование конструкции	Степень огнестойкости							
	I	II	III	IIIa	IIIб	IV	IVa	V
Несущие стены	2,5	2	2	1	1	0,5	0,5	нн
Наружные и внутренние ненесущие стены	0,5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	нн
Колонны	2,5	2	2	0,15	1	0,5	0,25	нн
Несущие конструкции покрытий	1	0,75	0,75	0,25	0,75	0,25	0,25	нн
Элементы покрытий	0,5	0,25	нн	0,25	0,25 0,5 0,75	нн	0,25	нн

По пожаро- и взрывоопасности помещения промышленных предприятий делят на 5 категорий.

Категория **А** (взрыво- и пожароопасные) – содержат горючие газы и легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) с температурой вспышки до 28 °С, образующие взрывоопасные смеси, при воспламенении которых развивается избыточное давление более 5 кПа, а также веществ, способных взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом.

Категория **Б** (взрыво- и пожароопасные) – содержат горючие пыли или волокна, способные образовывать взрывоопасные смеси, а также горючие жидкости с температурой вспышки от 28 до 61 °С.

Категория **В** (пожароопасные) – содержат горючие и трудногорючие твердые и жидкие вещества, способные только гореть при взаимодействии с водой, кислородом или друг с другом (надшахтные здания, угольные склады, погрузочные бункеры, галереи и эстакады, склады горючих и смазочных материалов с температурой вспышки более 61 °С, материальные склады и др.).

Категория Г (непожароопасные) – содержат негорючие вещества в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, а также горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива (кузницы, депо мотовозов на карьерах, автогаражи, газо- и электросварочные мастерские, котельные, трансформаторные киоски, электрораспределительные устройства и др.).

Категория Д (непожароопасные) – содержат негорючие вещества в холодном состоянии (склады инертной пыли, противопожарных материалов, водонапорные башни, насосные станции и другие неопасные в пожарном отношении объекты).

Здание относится к категории А, если суммарная площадь помещений категории А превышает 5 % всех помещений или 200 м<sup>2</sup>. В случае оборудования помещений установками автоматического пожаротушения допускается не устанавливать в здании категорию А, если доля помещений категории А менее 25 % (не более 1 000 м<sup>2</sup>).

Причинами возникновения экзогенных пожаров в поверхностных помещениях, кроме вышеперечисленных, могут быть нарушения правил эксплуатации отопительных систем, разряды статического и атмосферного электричества.

### **3. ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ**

#### **3.1. Теории самовозгорания**

Существует несколько теорий самовозгорания угля, объясняющих причину выделения тепла: пиритная, бактериальная, фенольная и теория комплекса уголь-кислород.

Согласно пиритной теории выделению тепла в угле способствует содержащийся в нем пирит ( $\text{FeS}_2$ ), вступающий во взаимодействие с кислородом воздуха и водой. Действительно, при его окислении выделяется в 1,5–2 раза больше тепла, чем при окислении угля. Окисление пирита в присутствии влаги сопровождается выделением серной кислоты и сульфата железа, оказывающих каталитическое действие на уголь. Серная кислота вступает в реакцию с углекислым магнием и кальцием и другими порода-

ми, находящимися в углях в виде прожилков, которые увеличиваются в объеме. В результате уголь растрескивается, увеличивается его сорбирующая поверхность. Однако пирит не может быть единственной причиной самовозгорания, так как часто самовозгораются угли с малым содержанием пирита (Кузнецкие угли).

Бактериальная теория предполагает, что при увлажнении угля происходит размножение имеющихся в нем микроорганизмов. В результате их жизнедеятельности образуется тепло, приводящее к нагреванию угля. При температуре 70 °С микроорганизмы погибают, но прогрев продолжается, так как начинаются химические реакции между разлагающимся растительным материалом и кислородом воздуха. Теория была опровергнута, так как эксперименты показали, что после пребывания в вакууме при 100 °С уголь сохраняет свою степень самовозгораемости.

Согласно фенольной теории самовозгорание угля происходит из-за присутствия в нем фенольных атомных групп, которые энергично поглощают кислород с выделением тепла. Авторы теории считают, что фенолы в присутствии влаги окисляются кислородом легче, чем углеводороды того же строения. Однако многие исследователи считают, что окисление угля не может обуславливаться какой-то одной химической составной его частью.

Теория комплекса уголь-кислород считает, что уголь при соприкосновении с кислородом воздуха сначала его адсорбирует с образованием неустойчивых соединений типа перекисей. Образование перекисей сопровождается выделением тепла. В условиях плохого его рассеивания температура нарастает, и скорость взаимодействия кислорода с углем увеличивается. Процесс адсорбции переходит в хемосорбцию. Происходит распад неустойчивых соединений с образованием более сложных уголь-кислородных комплексов. При распаде неустойчивых соединений происходит интенсивное выделение тепла и газообразных продуктов (СО, СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О и др.). Эта теория получила наибольшее признание и подтверждена практикой.

### 3.2. Условия развития эндогенного пожара

**Эндогенный пожар** – это пожар от самовозгорания горючего материала. Основным признаком эндогенного пожара в шахте является наличие оксида углерода (СО) в концентрации 0,01 % и выше в трех пробах воздуха, отобранных последовательно через каждые 6 ч в одной из точек контроля.

**Самовозгорание** – это процесс нарастания температуры в скоплении окисляющегося материала, переходящий в пламенное горение. Источником теплового импульса при этом является экзотермическая (с выделением тепла) реакция окисления материала (угля) кислородом, содержащемся в воздухе. Если теплота, выделяемая при окислении, полностью рассеивается в окружающей среде, то происходит низкотемпературное окисление.

**Стадия самонагревания** – это ранняя стадия эндогенного пожара, которая характеризуется малой скоростью протекания реакции окисления угля и медленным нарастанием его температуры до критической (90–130 °С).

Выделяют **район (контур) пожара** – это часть пласта, ограниченная по падению и простиранию, ведение работ в которой или ее подработка запрещается в связи с опасностью перепуска горящего угля или проникновения пожарных газов в действующие горные выработки.

**Локация эндогенного пожара** – определение местонахождения очага и границ его аэродинамической связи с примыкающими забоями.

**Локализация эндогенного пожара** – это предупреждение его развития с ограждением действующих выработок и очистных забоев от проникновения в них тепла и газов.

Эндогенные пожары в шахтах возникают в результате реакций окисления скоплений угля, скорость которых возрастает при повышении температуры. Основными условиями возникновения эндогенных пожаров являются:

- наличие материала, способного окисляться кислородом воздуха (уголь и углесодержащая порода, руда, угольный сланец, зерно, мука и др.);
- постоянный приток кислорода к окисляющейся поверхности частиц скопления;

– количество тепла, образующегося в процессе окисления, превышает количество тепла, теряемого очагом за счет теплопроводности, конвекции и излучения.

Вероятность самовозгорания угля зависит от многих факторов: химической активности угля, горно-геологических и горно-технических условий, которые определяют условия образования скоплений угля и приток к ним свежего воздуха. Поэтому вводят понятия: склонность угля к самовозгоранию; склонность шахтопласта к самовозгоранию; эндогенная пожароопасность.

**Склонность угля к самовозгоранию** является его внутренним свойством, обусловленным исходным материалом, и характеризует его способность взаимодействовать с кислородом (химическая активность).

Понятие **«склонность шахтопласта к самовозгоранию»** характеризует потенциальную опасность возникновения эндогенных пожаров при отработке угольного пласта в конкретных горно-геологических условиях. Вероятность возникновения эндогенных пожаров в шахтах зависит от комплекса природных и горнотехнических факторов, обеспечивающих образование скоплений угля, его высокую активность к кислороду, приток оптимального количества воздуха, а также условия, способствующие накоплению тепла, образующегося при окислительных реакциях. К природным факторам относятся химическая активность угля, геологическое строение месторождения (мощность пласта, угол падения и др.), структура пласта (пористость, трещиноватость), его тектоническая нарушенность и характер вмещающих пород (крепость, устойчивость, трещиноватость, слеживаемость).

С учетом влияния на эндогенную пожароопасность угольных шахт природные факторы разделяются на три группы (табл. 3.1): малоопасные, опасные и весьма опасные.

Определение склонности шахтопласта к самовозгоранию производится в три этапа. На первом этапе оценивается химическая активность угля. На втором этапе по данным геологической разведки определяется наличие объективных условий для образования потерь угля в выработанном пространстве шахтопластов при их разработке и притока к ним воздуха. На третьем этапе проверяется наличие эндогенных пожаров на пластах-аналогах соседних шахт.

Таблица 3.1

Классификация природных факторов по степени влияния на эндогенную пожароопасность угольных шахт

Факторы	Степень опасности		
	Малоопасно	Опасно	Весьма опасно
Химическая активность угля, $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$	Менее 0,025	0,025–0,050	Более 0,050
Угол падения пласта, град	Менее 35	35–55	Более 55
Мощность пласта, м	Менее 1,3	1,3–3,5	Более 3,5
Геологические нарушения	Нет	Пликативные	Дизъюнктивные
Пропластки суммарной мощностью более 0,2 м во вмещающих породах	Нет	В почве в пределах одной мощности рабочего пласта	В кровле в пределах трех мощностей рабочего пласта

Шахтопласты угля по склонности к самовозгоранию разделяются на три категории: *не склонные*, *склонные* и *весьма склонные*.

К категории *не склонных к самовозгоранию* относятся шахтопласты, имеющие химическую активность угля менее  $0,025 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$  со значениями природных факторов «угол падения пласта», «мощность пласта», «геологические нарушения», «пропластки угля суммарной мощностью более 0,2 м во вмещающих породах» в пределах группы «малоопасно».

К категории *склонных к самовозгоранию* относятся шахтопласты с химической активностью угля от  $0,025$  до  $0,050 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$  при значениях других природных факторов в пределах групп «опасно» и «весьма опасно».

К категории *весьма склонных к самовозгоранию* относятся шахтопласты с высокой химической активностью угля (более  $0,050 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$ ) при значениях природных факторов в пределах групп «опасно» и «весьма опасно».

Если шахтопласт имеет низкую химическую активность угля (менее  $0,025 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$ ), но на пластах-аналогах возникли эндо-

генные пожары, то он относится к категории «склонных к самовозгоранию».

**Эндогенная пожароопасность** обуславливается химической активностью, горно-геологическими и горнотехническими факторами, от которых зависят параметры образующихся скоплений, условия теплообмена и притока кислорода.

Наиболее часто в шахтах эндогенные пожары возникают:

- в выработанном пространстве;
- целиках, прилегающих к горным выработкам;
- горных выработках.

Для появления процесса самовозгорания окисляющийся материал должен иметь развитую поверхность, контактирующую с поступающим кислородом атмосферного воздуха. Поэтому на угольных предприятиях эндогенные пожары чаще всего формируются в скоплениях разрыхленного угля или углесодержащих пород. Через такие скопления легко фильтруется воздух, доставляющий кислород к активным центрам, а, кроме того, разрыхленный уголь имеет небольшой коэффициент теплопроводности, что обеспечивает минимальные потери выделяющегося тепла. В шахте такие скопления угля образуются при разрушении охранных, барьерных, аварийных и других целиков, теряемых в выработанном пространстве (в Кузбассе до 90 % эндогенных пожаров возникает в выработанном пространстве).

Недоступность таких пожаров приводит к тому, что эффективность их тушения оценивается только по косвенным признакам (концентрации пожарных газов, температуре воды, воздуха). Поэтому возможны **рецидивы пожара** – это активизация ранее потушенного пожара. Так аттестуют пожары, обнаруживаемые в выемочном поле в течение трех месяцев с момента его вскрытия после окончания тушения или независимо от срока, если поле не вскрывалось для доработки после списания пожара в категорию потушенных.

Существенную эндогенную пожароопасность представляют скопления угля, оставляемые вынужденно в зонах тектонических нарушений и при авариях во время ведения горных работ. Так, исследования показали, что в зонах тектонических нарушений пласт угля имеет повышенную трещиноватость, что облегчает доступ воздуха к активным центрам. Кроме того, уголь в зонах

нарушений обладает высокой химической активностью вследствие активации, произошедшей при нагревании вследствие трения пород. Пожары этого типа делятся на два подтипа: в выработанном пространстве действующего и отработанного участков.

Пожары в целиках, прилегающих к горным выработкам, возникают при отработке пологих и наклонных пластов вследствие разрушения оставленных целиков малых размеров и из-за больших перепадов давления воздуха. Очень пожароопасными становятся межэтажные целики, так как они являются концентрированными скоплениями, через которые длительное время просачивается воздух.

Пожары в горных выработках возникают в местах скопления разрыхленных масс угля, образовавшихся над крепью, в печах, просеках, штреках, при отжиме угля и пр.

Очаги эндогенных пожаров развиваются также в скоплениях горючего материала, располагающегося на земной поверхности: на складах угля, породных отвалах, бортах угольных разрезов. При соприкосновении с кислородом воздуха окисляющийся материал разогревается, а при температуре 50–100 °С процесс ускоряется и кислород активно сорбируется (поглощается) его поверхностью. В сорбции активно участвуют не только внешняя поверхность куска угля, но и внутренние поверхности пор, трещин.

### 3.3. Генерация тепла при окислении угля

Пористая структура ископаемых углей определяет характер газовыделения и интенсивность проникновения в уголь кислорода. Внутренняя поверхность угля равна  $(1-1,5) \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/кг, а удельная поверхность пор с размером  $10^{-7}-10^{-6}$  м, достаточным для проникновения молекул кислорода, составляет  $(1-2) \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>/кг. Реакция окисления угля кислородом является гетерогенной, происходящей на границе раздела твердой и газовой фаз, состоящей из следующих стадий:

- диффузия исходных веществ;
- химическая реакция, начинающаяся на поверхности (состоящая из физической адсорбции кислорода и хемосорбции);
- десорбция частиц продуктов реакции;

– диффузия частиц из реакционной зоны в глубь одной из фаз.

Первая и последняя стадии – диффузионные области, остальные – кинетические. В целом процесс может переходить из одной области в другую. Так, в начальной стадии, при низкой скорости взаимодействия и достаточном притоке кислорода, процесс находится в кинетической области. При высоких температурах скорость взаимодействия резко возрастает, и процесс зависит только от скорости подвода кислорода (диффузионная область).

Молекула кислорода при низкой температуре инертна и легко реагирует только со свободными радикалами. В угле всегда имеются свободные радикалы, число которых достигает  $10^{21}$  на 1 кг. Радикалы – это частицы, обладающие свободными валентностями, что сообщает им высокую химическую активность. Они возникают при распаде отдельных химических связей (при отщеплении летучих продуктов: метан,  $H_2$ , CO,  $CO_2$  и др.), в том числе при механическом разрушении угля (механоактивация). В соответствии с цепной теорией окисления органических соединений промежуточные продукты окисления являются также радикалами, способными вступать в реакцию с валентнонасыщенными молекулами с образованием новых радикалов при значительно меньшей энергии разрыва связей. Возможны три варианта цепных процессов:

1 – образование неразветвленной длинной цепи, которая может прерываться только при рекомбинации радикалов между собой;

2 – образование из одного радикалов нескольких, т. е. разветвленная цепная реакция;

3 – образование дополнительных радикалов в ходе мономолекулярного распада продуктов реакции при неразветвляющейся основной цепи, которые образуют новые цепи, т. е. происходит вырожденное разветвление с медленным ускорением.

Химическая активность самовозгорающихся материалов при их окислении на воздухе оценивается по скорости поглощения ими кислорода. Скорость поглощения кислорода зависит от концентрации кислорода, которая в шахте не остается постоянной, и выражается через константу скорости окисления. Последняя численно равна скорости окисления при концентрации ки-

слорода, равной 1 (100 %), и имеет размерность в  $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$  или  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . При поглощении кислорода углем выделяется тепло ( $12,5 \text{ МДж}/\text{м}^3$ ).

Химический характер реагирования кислорода с углем определяет тот факт, что между кислородом и углем равновесие не устанавливается. Поэтому в изолированном объеме кислород поглощается полностью. Для низкотемпературного окисления угля характерно замедление скорости сорбции во времени за счет утолщения окисленного слоя на реагирующей поверхности угля, увеличивающей сопротивление притоку кислорода. Рост температуры активизирует процесс окисления угля, который описывается законом Аррениуса. Энергия активации реакции окисления зависит от марки угля и увеличивается в ряду от бурых углей до антрацитов от  $8,3\cdot 10^4$  до  $13,8\cdot 10^4$  Дж/моль. Чем меньше энергия активации и больше температура, тем больше скорость процесса окисления угля.

Процесс окисления угля при взаимодействии с кислородом воздуха может включать следующие механизмы: диффузионно-конвективный газообмен у поверхности угля; адсорбцию и десорбцию кислорода и других газов поверхностью угля; химическое взаимодействие – окисление угля; испарение жидкой фазы, содержащейся в угле; термическое разложение угля с образованием летучих продуктов; теплообмен внутри системы и со средой.

### 3.4. Определение скорости окисления угля

Количество выделяющегося в процессе самовозгорания тепла пропорционально химической активности углей, которая оценивается по скорости поглощения ими кислорода. С увеличением степени метаморфизма углей их химическая активность уменьшается. В то же время в пределах одной и той же степени метаморфизма угли могут отличаться по химической активности, что, прежде всего, связано с его петрографической структурой. Угли с пористой структурой более активны, чем с плотной структурой.

Вблизи земной поверхности в зоне выветривания химическая активность углей понижена вследствие окислительной дезактивации. В зонах тектонических нарушений и в старых горных

выработках угли могут иметь повышенную химическую активность в результате дегазации и увеличения пористости из-за разгрузки от горного давления. С повышением температуры химическая активность углей повышается.

Отбор проб угля для определения химической активности производится на стадии предварительной или детальной разведки, а также в процессе эксплуатации месторождения. Пробы отбирают не менее чем в двух точках, расположенных на расстоянии 50–70 м друг от друга по падению или простиранию пласта на каждом крыле шахтного поля. Для отбора пробы на свежее обнаженной поверхности угольного пласта по всей его мощности вырубаются полосы перпендикулярно напластованию горных пород. Отбитый уголь массой 4 кг дробят на куски размером 40–60 мм, помещают в герметичный сосуд и отправляют в лабораторию.

Для определения химической активности угля отобранную в шахте пробу измельчают, просеивают на ситах для выделения фракции 1–3 мм и немедленно исследуют на установке. Установка (рис. 3.1) состоит из сорбционного сосуда 1, имеющего верхнюю пробку 2, слой стеклянных палочек 3, на которые помещают пробу угля, а также нижний кран 4, через который отбирается проба воздуха. Пробоотборная пипетка 5 соединена трубками через нижний кран с сорбционным сосудом 1 и с емкостью 6, содержащей раствор сульфата натрия. Вакуумный насос 7 создает разрежение в емкости 6.

Испытываемая проба угля помещается в сорбционный сосуд 1, заполненный воздухом, на слой стеклянных палочек и герметически закрывается. Предварительно на дно сосуда заливают около  $10 \text{ см}^3$  воды, с условием, что уголь не контактирует с водой. Опыт протекает при постоянной температуре (обычно  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), для чего сорбционный сосуд помещают в термостат. По истечении определенного времени (обычно через 24 часа) из сорбционного сосуда отбирают пробу газа и определяют убыль в ней кислорода.

Для отбора пробы газа пипетка 5 заполняется раствором из емкости 6 и соединяется с сорбционным сосудом 1. С помощью вакуумного насоса 7 в емкости 6 создается разрежение, что приводит к перемещению в него раствора из пипетки 5. Воздух из

сорбционного сосуда 1 замещает раствор в пипетке 5. Затем краны 4 закрываются, а отобранная проба воздуха подается в газоанализатор для определения концентрации кислорода. Для продолжения опыта в сорбционном сосуде 1 восстанавливают нормальный состав воздуха. С этой целью его продувают воздухом в течение 5 мин, затем вновь герметизируют.

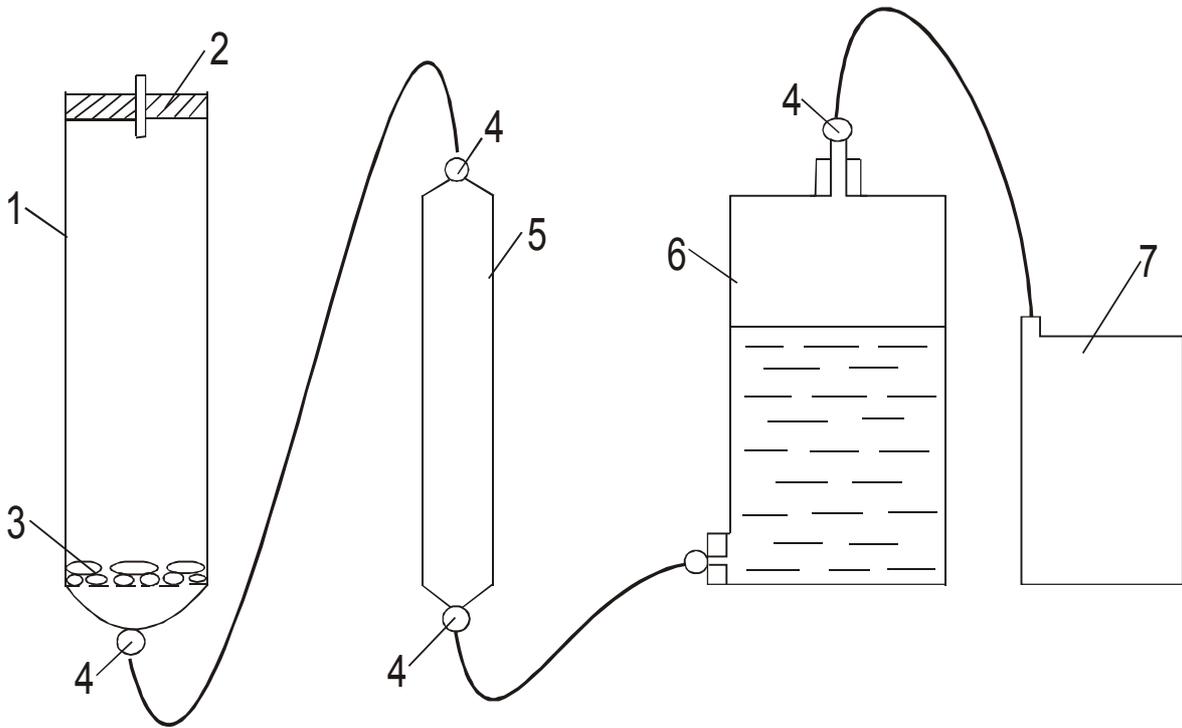


Рис. 3.1. Установка для определения химической активности углей: 1 – сорбционный сосуд; 2 – пробка; 3 – стеклянные палочки; 4 – кран; 5 – пробоотборная пипетка; 6 – емкость с раствором; 7 – вакуумный насос

Если через  $V$  обозначить объем воздуха, находящийся в соприкосновении с углем массой  $M$ , то количество  $H$  сорбированного кислорода на единицу массы угля за единицу времени равно

$$\frac{dH}{Md\tau} = -\frac{VdC}{Md\tau}, \quad (3.1)$$

где  $C$  – концентрация кислорода в сосуде, доли единицы;  $\tau$  – время контакта воздуха с углем, ч.

Экспериментально установлено, что скорость сорбции пропорциональна концентрации кислорода

$$-\frac{VdC}{Md\tau} = KC, \quad (3.2)$$

где  $K$  – кинетическая константа скорости сорбции, численно равная скорости сорбции при концентрации кислорода 100 %,  $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$ .

Интегрирование этого уравнения позволяет получить следующую зависимость для определения константы скорости сорбции кислорода углем:

$$K = -\frac{V}{\tau M} \ln \frac{C_\tau}{C_0}, \quad (3.3)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация кислорода в сосуде;  $C_\tau$  – концентрация кислорода через время  $\tau$ .

Поглощение кислорода углем происходит при постоянном объеме газа в сорбционном сосуде, что приводит к разряжению воздуха. После отбора пробы она сжимается, что вызывает увеличение в ней концентрации кислорода. Для вычисления истинной концентрации кислорода в сорбционном сосуде применяется формула

$$C_\tau = \frac{C_A(1 - C_0)}{(1 - C_A)}, \quad (3.4)$$

где  $C_A$  – концентрация кислорода в пробе отобранного воздуха.

С учетом изменения барометрического давления и упругости водяных паров в воздухе вычисление константы скорости сорбции кислорода производится по формуле

$$K = -\frac{V(B - 23,8)}{M\tau 760} \ln \frac{C_A(1 - C_0)}{C_0(1 - C_A)}, \quad (3.5)$$

где  $B$  – барометрическое давление перед началом сорбции, мм рт. ст.; 23,8 – упругость паров воды при 25 °С, мм рт. ст.

По мере проведения опыта химическая активность угля уменьшается, что объясняется образованием слоя окисленного угля, препятствующего проникновению кислорода к активным

центрам. Поэтому в течение эксперимента определяют константы скорости сорбции через 50, 100, 150, 200 и 250 ч и наносят на график (рис. 3.2). Затем по формуле (3.6) определяют среднеарифметическое значение, которое является основным показателем химической активности угля и обозначается  $K_{25}$ .

$$K_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (3.6)$$

где  $n$  – число определений константы скорости сорбции кислорода углем в процессе эксперимента;  $K_i$  – текущее значение константы скорости сорбции кислорода углем,  $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$ .

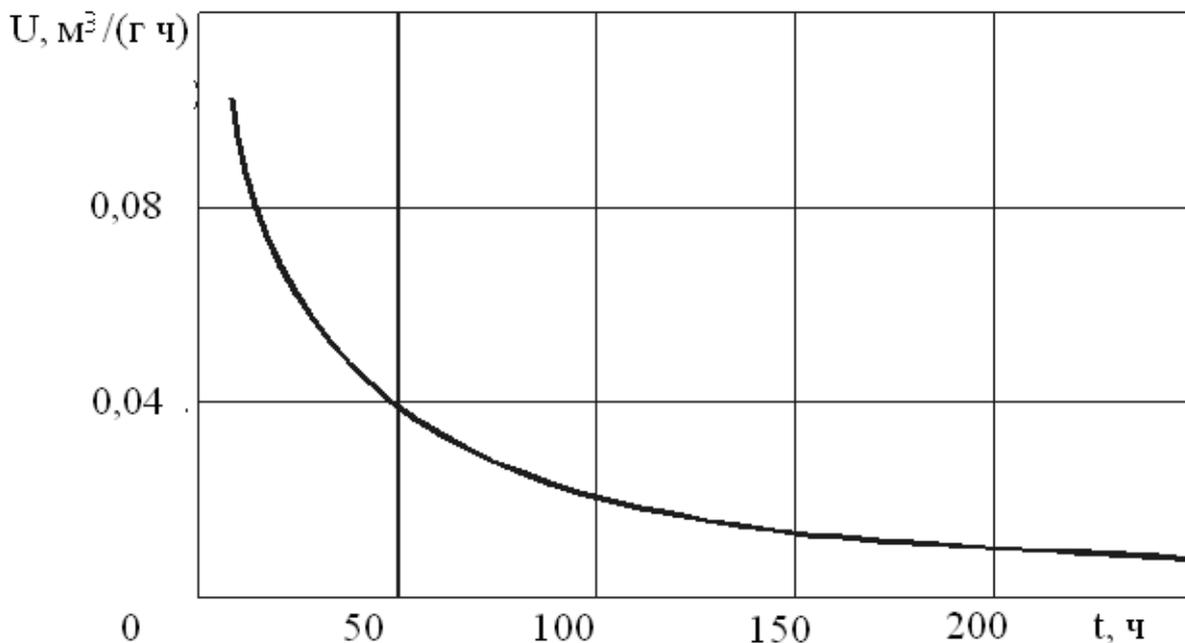


Рис. 3.2. Изменение константы сорбции кислорода углем во времени

Значение константы скорости сорбции за первые двое суток не входит в вычисление показателя химической активности угля потому, что в начале сорбции воспроизводимость результатов хуже, чем в дальнейшем. По данным многолетних исследований химическая активность бурых углей освоенных месторождений России колеблется в пределах  $0,080\text{--}0,160 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$ . Для камен-

ных углей характерны значения химической активности от 0,010 до 0,080 см<sup>3</sup>/(г·ч).

### 3.5. Моделирование процесса самовозгорания

Процесс самовозгорания зависит от множества факторов, причем часть из них может изменяться произвольно в процессе эксплуатации шахты, а многими можно управлять целенаправленно. Под действием этих факторов возможно ускорение, замедление или прекращение развития процесса самовозгорания на любой стадии. Однако в шахтах очаги самовозгорания обычно развиваются в недоступных для человека местах, что не позволяет детально исследовать этот процесс. Из-за недостаточной изученности влияния на процесс самовозгорания различных факторов зачастую невозможно прогнозировать поведение очагов эндогенных пожаров. В таких условиях затруднен выбор наиболее эффективных способов подавления процесса самовозгорания.

Недостаток информации об особенностях поведения очагов эндогенных пожаров существенно увеличивает опасность для шахтеров и горноспасателей, находящихся в шахте. Поэтому необходимо дальнейшее исследование влияния различных факторов на развитие эндогенных пожаров. Ранжирование этих факторов по степени значимости позволит предложить новые и усовершенствовать известные способы борьбы с самовозгоранием угля. Полученные данные могут употребляться для прогноза эндогенной пожароопасности и оценки тенденции поведения очагов самовозгорания.

Для исследования процессов самовозгорания применяют физическое и математическое моделирование. Полное физическое моделирование исследуемых процессов зачастую встречает непреодолимые трудности из-за невозможности произвольно изменять численные значения многих параметров. Известные попытки физического моделирования процесса самовозгорания не позволили оценить влияние отдельных факторов на этот процесс из-за трудоемкости, длительности эксперимента. Однако основным препятствием для получения обоснованных выводов является невозможность воспроизводимости физических экспериментов, обусловленная изменением физических и химических свойств исследуе-

мой массы угля в каждом новом опыте. Данным фактом, видимо, можно объяснить различные мнения о пожароопасных параметрах некоторых факторов и даже о качественном воздействии части из них на процесс самовозгорания.

Наиболее эффективным методом оценки влияния отдельных факторов на процесс самовозгорания угля является математическое моделирование, позволяющее с минимальными затратами исследовать влияние любого параметра. В основе всех математических моделей лежат уравнения, описывающие генерацию и потери тепла в скоплении окисляющегося материала. Уравнение массопереноса описывает распределение кислорода в скоплении с учетом процессов сорбции кислорода углем.

С целью получения аналитического решения уравнения максимально упрощаются. Наиболее простой является математическая модель процесса самовозгорания, описывающая нестационарный тепло- и массоперенос в одномерном скоплении угля. Перенос тепла, генерируемого при взаимодействии кислорода с углем, осуществляется за счет теплопроводности и конвекции. С учетом испарения начальной влаги и экспоненциальной зависимости скорости сорбции кислорода углем от температуры процесс можно описать следующими уравнениями:

$$(1-m)\rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (1-m) + (1-m)\rho_1 C Q K \exp(-E/RT) - \rho_2 c_2 V \frac{\partial T}{\partial x} - Q_W \rho_3 \frac{\partial W}{\partial \tau}; \quad (3.7)$$

$$m \frac{\partial C}{\partial \tau} = mD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} - (1-m)\rho_1 C K \exp(-E/RT). \quad (3.8)$$

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} T_{(x,0)} &= T_0; & C_{(x,0)} &= C_0; & W_{(x,0)} &= W_0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_1 (T - T_0); & \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_2 (T - T_0); & \frac{\partial W}{\partial \tau} \Big|_{T(373)} &= 0; \\ D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{c1} (C - C_0); & D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \alpha_{c2} (C - C_0), \end{aligned} \quad (3.9)$$

где  $m$  – пористость скопления угля;  $\rho_1$  – плотность угля, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1$  – теплоемкость скопления угля, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К);  $C$  – концентрация кислорода;  $Q$  – тепловой эффект реакции

окисления, Дж/м<sup>3</sup>;  $K$  – константа скорости окисления, м<sup>3</sup>/(кг·с);  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\rho_2$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $c_2$  – теплоемкость газа, Дж/(кг·К);  $V$  – скорость фильтрации газа, м/с;  $Q_w$  – удельная теплота испарения воды, Дж/кг;  $\rho_3$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность угля;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии кислорода, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_i$  – коэффициент теплоотдачи от угля, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{ci}$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $L$  – размер угольного скопления, м.

Решение системы уравнений (3.8) можно осуществить конечно-разностным методом с реализацией на ПЭВМ. При моделировании можно оценить влияние на процесс самовозгорания таких изменяющихся факторов, как коэффициент теплопроводности и теплоемкость скопления, влажность, сорбционная активность и начальная температура угля, а также скорость воздуха и концентрация кислорода в нем.

Проведенное физическое (в лабораторных условиях) и математическое моделирование показали, что процесс самовозгорания угля имеет несколько стадий (рис. 3.3). Первая стадия – низкотемпературное окисление – характеризуется медленным, но постепенно возрастающим повышением температуры до 50–80 °С. Выделение тепла происходит в основном из-за адсорбции кислорода. По мере повышения температуры адсорбция переходит в хемосорбцию. В результате образуются комплексы кислород – уголь, покрывающие пленкой поверхность угля. Незначительная часть комплексов разрушается с выделением оксида углерода, углекислого газа, водорода и других газов. Длительность первой стадии зависит от химической активности угля, условий теплообмена скопления с окружающей средой и может продолжаться от 10 до 100 сут.

Первая стадия может закончиться остыванием скопления угля или переходом во вторую стадию в зависимости от свойств угля и внешних условий. Так, образующаяся пленка окисленного угля препятствует доступу кислорода к активным центрам, что снижает скорость взаимодействия компонентов и количество выделяющегося тепла. В то же время с повышением температуры экспоненциально возрастает химическая активность угля по от-

ношению к кислороду. В зависимости от того, какой из этих процессов будет доминирующим, зависит исход первой стадии.

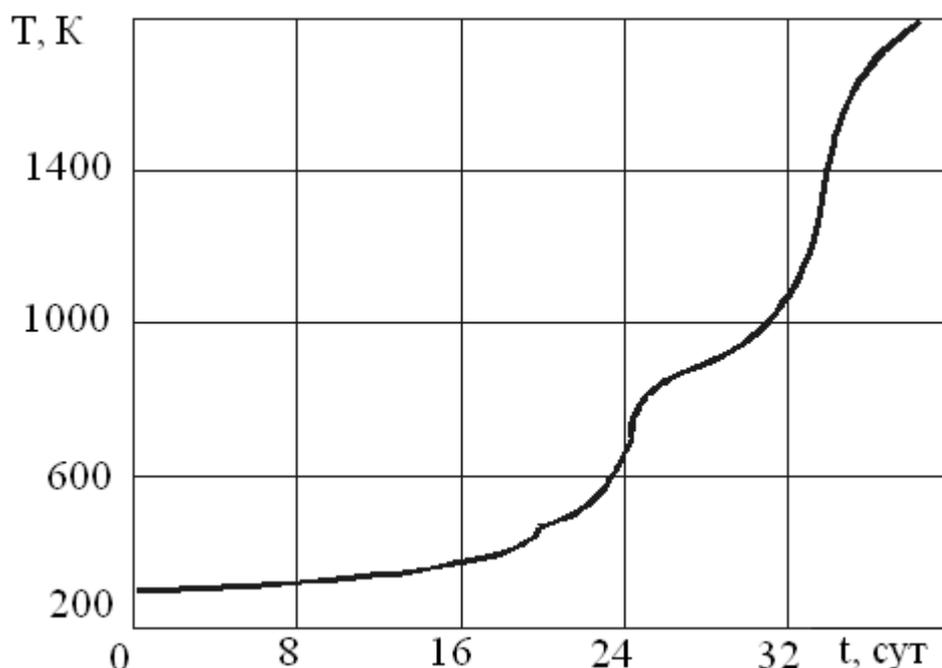


Рис. 3.3. Изменение максимальной температуры угля в процессе самовозгорания

Вторая стадия происходит при выпаривании имеющейся изначально в угле влаги, а также образованной в результате химических реакций воды в интервале температур 60–120 °С. Из-за больших потерь тепла на испарение жидкой фазы температура скопления стабилизируется или даже немного понижается. Длительность второй стадии может достигать до 30 сут и зависит от интенсивности выделения тепла и его потерь в окружающее пространство. После испарения жидкости большая часть образующегося тепла идет на повышение температуры угля.

Начинается третья стадия – возгорание, особенностью которого является быстрый рост температуры окисляющегося материала. Поступающий кислород перестает удерживаться углем и весь переходит в летучие продукты окисления. При дальнейшем повышении температуры летучие горючие вещества (СО, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub> и др.), выделяемые углем, начинают реагировать с кислородом. Когда концентрация этих веществ вблизи поверхности угля достигает предела воспламенения, образуется пламя.

При температуре воспламенения с углем начинают реагировать  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Образующиеся горючие газы  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  взаимодействуют с притекающим кислородом, выделяя значительное количество тепла. Реакция угля с  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  эндотермична (поглощает тепло), поэтому температура угля становится ниже температуры прилегающего к нему слоя газа. Она поддерживается конвективным переносом тепла и излучением из фронта пламени. После появления пламени температура очага стабилизируется на уровне, определяемом притоком свежего воздуха.

Развитие первой стадии (низкотемпературного окисления) может происходить при небольшом притоке кислорода. Исследования показали, что необходимое количество кислорода может обеспечить молекулярная диффузия. Однако по мере роста температуры потребность в кислороде увеличивается и для его подвода требуется фильтрация воздуха через разогревающееся скопление.

В зависимости от физико-химических свойств окисляющегося материала существует оптимальная скорость фильтрации воздуха, которая обеспечивает максимальный для данных условий прирост температуры. В случае если скорость воздуха меньше оптимальной, скорость повышения температуры замедляется, начинается перемещение очага навстречу потоку воздуха. Превышение скорости фильтрации воздуха оптимального значения приводит к усиленному выносу тепла из очага, что сопровождается замедлением процесса самовозгорания и может вызвать перемещение очага по ходу струи газа.

По мере повышения температуры угля в скоплении начинает увеличиваться выделение различных газов. Так, возрастает выделение метана, радона, на стадии выпаривания усиливается вынос водяного пара. Экспоненциально с ростом температуры увеличивается образование оксида углерода, водорода, углекислого газа, этана, пропана, этилена, пропилена и других углеводородов.

### 3.6. Влияние некоторых параметров на процесс самовозгорания угля

Для оценки степени влияния отдельных параметров на процесс самовозгорания использовалась система уравнений (3.8)–(3.9). В качестве модели выбиралось скопление угля со следующими базовыми параметрами:  $L = 3,0$  м;  $\rho_1 = 1\,200$  кг/м<sup>3</sup>;  $m = 0,3$ ;  $Q = 1,26 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>;  $E = 6,28 \cdot 10^4$  Дж/моль. С целью упрощения расчетов испарение влаги происходило при температуре 373 К, а его скорость подбиралась из условия поддержания этой температуры до полного высушивания угля.

При оценке влияния отдельных факторов на процесс в качестве критерия использовали время разогрева скопления угля до температуры 423 К (150 °С). Расчеты показали, что довольно существенно на процесс самовозгорания воздействует изменение теплоемкости угля (рис. 3.4, а). Повышение теплоемкости угля от 1,1 до 1,8 кДж/(кг·К), т. е. в 1,6 раза, увеличивает длительность начальной стадии в 1,5 раза. Время разогрева угля в зависимости от теплоемкости выражается формулой

$$\tau = 10,0736 \exp(0,00065c_1), \quad (3.10)$$

где  $\tau$  – длительность разогрева до 423 К, сут;  $c_1$  – теплоемкость скопления угля, Дж/(кг·К).

Изменение коэффициента теплопроводности скопления угля незначительно влияет на начальную стадию разогрева (рис. 3.4, б). Так, увеличение коэффициента теплопроводности в 2 раза приводит к росту времени разогрева до критической температуры только в 1,04 раза. Длительность формирования области с заданной температурой в зависимости от коэффициента теплопроводности угля можно описать уравнением

$$\tau = 20 + 4,0\lambda, \quad (3.11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности скопления угля, Вт/(м·К).

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что изменение теплопроводности и теплоемкости угольных скоплений может только замедлить процесс самовозгорания, но не

предотвратить его. Поэтому увеличение этих параметров целесообразно производить в комплексе с другими воздействиями.

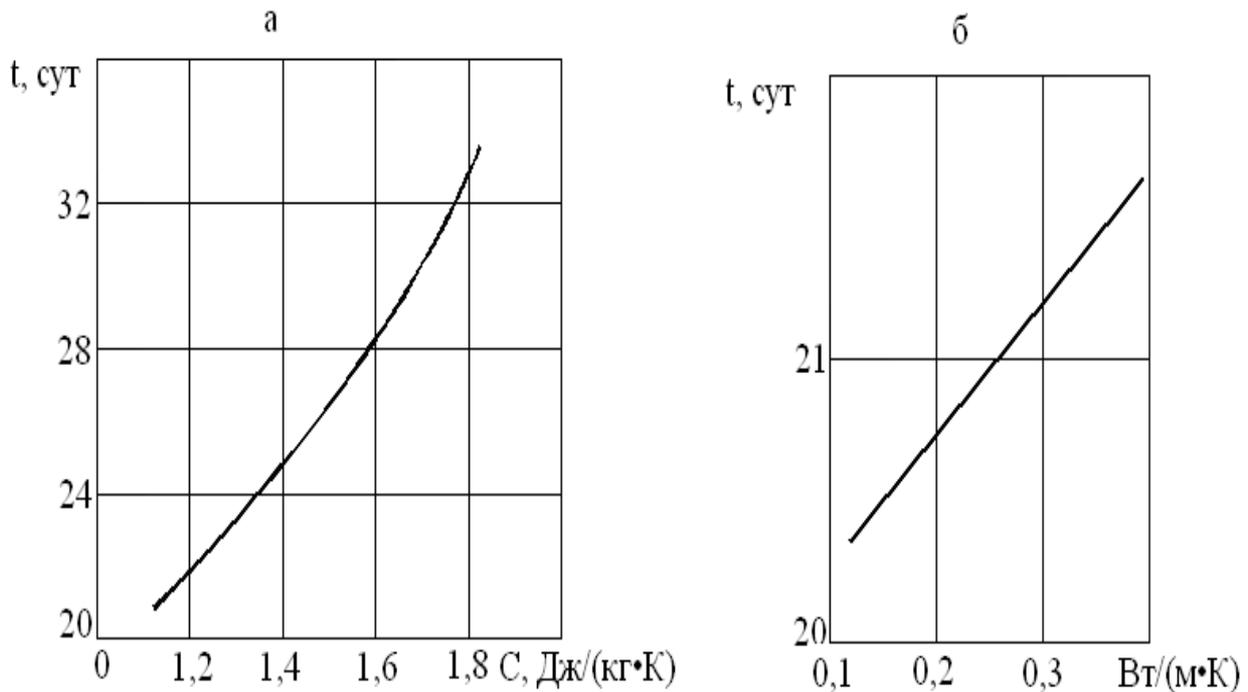


Рис. 3.4. Влияние теплоемкости (*a*) и коэффициента теплопроводности (*б*) скопления угля на длительность разогрева до 423 К

Существенно затормозить или предотвратить процесс самовозгорания угля способна инертизация (например, разбавлением воздуха инертными газами), приводящая к снижению концентрации кислорода в воздухе (рис. 3.5, *a*). В этом случае наблюдается увеличение продолжительности как начальной стадии разогрева, так и стадии экспоненциального повышения температуры. Из расчетов следует, что при заданной химической активности угля и содержании кислорода менее 10 % возгорания угля в расчетные 100 суток не произошло. Интересно отметить, что по мере падения концентрации кислорода в потоке воздуха уменьшается и величина оптимальной скорости воздуха, обеспечивающей наибольший прирост температуры.

Степень влияния этого параметра иллюстрируется тем фактом, что сокращение концентрации кислорода в 1,7 раза приводит к увеличению продолжительности развития процесса самовозгорания до принятой критической температуры в 2,4 раза. Даль-

нейшее снижение содержания кислорода вызывает резкое падение скорости разогрева. Длительность разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода в воздухе можно определить по выражению

$$\tau = 1/(23,56 \cdot 10^{-3} \ln C - 119 \cdot 10^{-3}), \quad (3.12)$$

где  $C$  – концентрация кислорода.

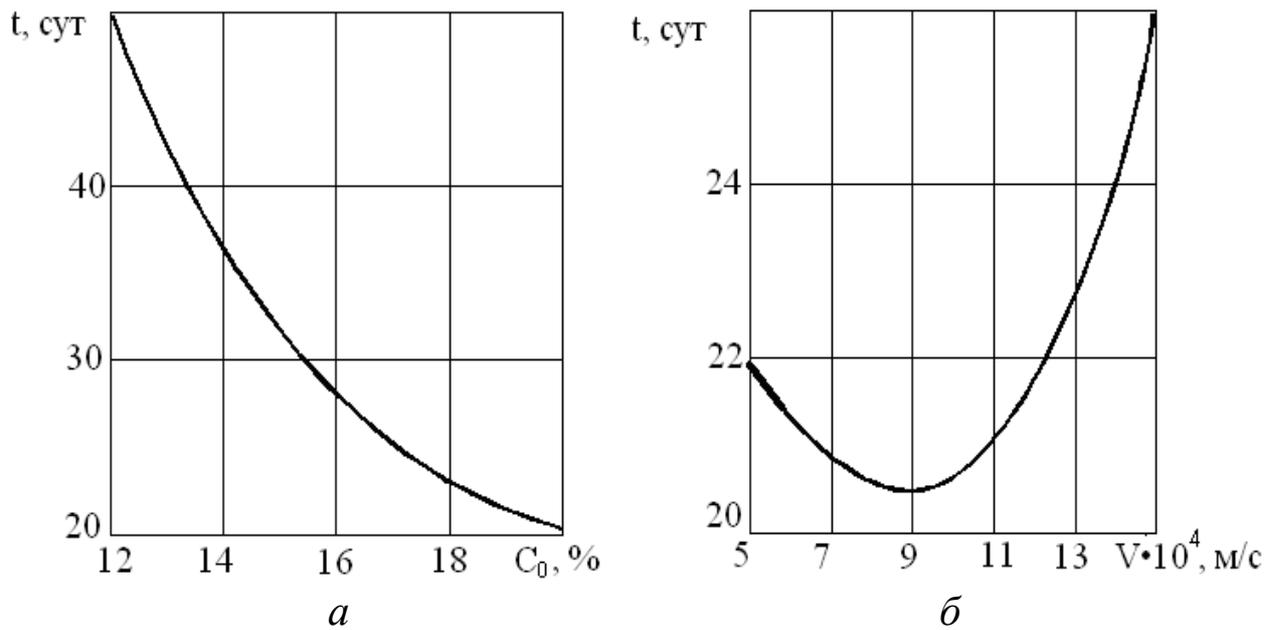


Рис. 3.5. Время разогрева угля в зависимости от концентрации кислорода (*а*) и скорости фильтрации воздуха (*б*)

Приведенные результаты свидетельствуют о целесообразности и эффективности применения инертнизации атмосферы выработанного пространства для предотвращения развития самовозгорания угля. Однако в ходе моделирования установлено, что критическое значение концентрации кислорода, позволяющее предотвратить эндогенный пожар, является переменной величиной, зависящей от ряда факторов. В наибольшей степени на критическую концентрацию влияют сорбционная активность угля и скорость фильтрующегося газа. Так, увеличение сорбционной активности угля в 1,4 раза по сравнению с базовым вариантом соз-

дает условия для развития высокотемпературного очага в течение 50–70 сут при концентрации кислорода 10 %.

Аналогичное действие оказывает скорость фильтрации газа. Например, снижение расхода газа через скопление угля до  $6 \cdot 10^{-4}$  м/с при концентрации кислорода 10 % и сохранении остальных базовых параметров скопления также приводит к возникновению эндогенного пожара через 70–80 сут. Поэтому при реализации способа предотвращения эндогенных пожаров путем инертизации атмосферы выработанного пространства возникают трудности с определением пожаробезопасной концентрации кислорода. Кроме того, сниженное содержание кислорода необходимо поддерживать в течение длительного времени, что потребует расхода большого количества инертного газа. Осложняет использование способа инертизации для предупреждения эндогенных пожаров опасность выноса инертной атмосферы из выработанного пространства в действующие горные выработки.

Исследование влияния расхода проходящего через уголь воздуха на процесс самовозгорания осуществлялось в интервале скоростей от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  м/с. На рис. 3.5, б приведено влияние скорости продувки воздуха на время разогрева скопления угля до заданной температуры. Описать данную зависимость можно уравнением

$$\tau = \exp(296,18 \cdot 10^3 V^2 - 397 \cdot 10^{-3} \ln V), \quad (3.13)$$

где  $V$  – скорость фильтрации воздуха, м/с.

Полученные результаты показывают, что изменение скорости воздуха неоднозначно влияет на процесс самовозгорания. Для каждого конкретного случая, определяемого набором свойств скопления угля и влиянием окружающей среды, существует оптимальная скорость, при которой достигается наибольший рост температуры. Причем величина оптимальной скорости меняется на всем протяжении конкретного процесса самовозгорания по мере роста температуры. На первых стадиях, при низкотемпературном окислении, эта скорость минимальна. При увеличении температуры угля для поддержания максимального темпа разогрева требуется непрерывное повышение скорости фильтрующегося воздуха.

В ходе исследования оценивалась также возможность развития самонагрева угля за счет одной молекулярной диффузии кислорода. Расчеты показали, что при диффузионном переносе кислорода разогрев возможен, но только до определенной температуры и с небольшой скоростью. Так, при пористости угля 0,4 максимальная температура стабилизации процесса самовозгорания составила 419 К при времени процесса 200 сут. Для угля пористостью 0,15 стабилизация процесса самонагрева наступила на 340 сут при температуре 344 К.

В случае выбора способа предотвращения самовозгорания путем снижения или повышения расхода фильтрующегося воздуха необходимо учесть, что неравномерность аэродинамического сопротивления выработанного пространства создает условия для широкого изменения скорости воздуха в различных областях сформировавшихся угольных скоплений. Поэтому варьирование количеством утечек воздуха через выработанное пространство может вывести из оптимального режима самовозгорания одни области, но увеличить вероятность развития эндогенного пожара в других. Реализация способов предотвращения самовозгорания угля путем изменения величины утечек воздуха зачастую затруднена по техническим и технологическим причинам.

Влияние начальной влажности скопления угля на длительность процесса самовозгорания до температуры 423 К представлено на рис. 3.6, *a*. В расчетах учитывалось замедление скорости разогрева, обусловленное только потерями тепла на испарение жидкой фазы при фиксированной температуре 373 К. Анализ полученных результатов показывает, что увлажнение является довольно эффективным средством увеличения продолжительности начальной стадии развития процесса самовозгорания. Длительность разогрева до принятой температуры можно описать уравнением

$$\tau = 20,7 + 0,227W, \quad (3.14)$$

где  $W$  – влажность угольного скопления.

Из приведенных данных следует, что увеличение влажности в 4 раза (с 10 до 40 %) приводит к росту времени разогрева до критической температуры в 1,3 раза. Однако эффект торможения

процесса самовозгорания увеличением влажности скопления угля зависит от ряда других факторов. В значительной степени на время замедления, обусловленное процессом испарения влаги, влияет химическая активность угля, скорость фильтрации воздуха. Так, при снижении химической активности угля наблюдается увеличение длительности выпаривания влаги. Поэтому целесообразно использовать антипирогены, приводящие к увлажнению угля. В этом случае продолжительность процесса самовозгорания увеличивается за счет суммарного действия этих факторов в большей степени, чем при сумме воздействий каждого фактора отдельно.

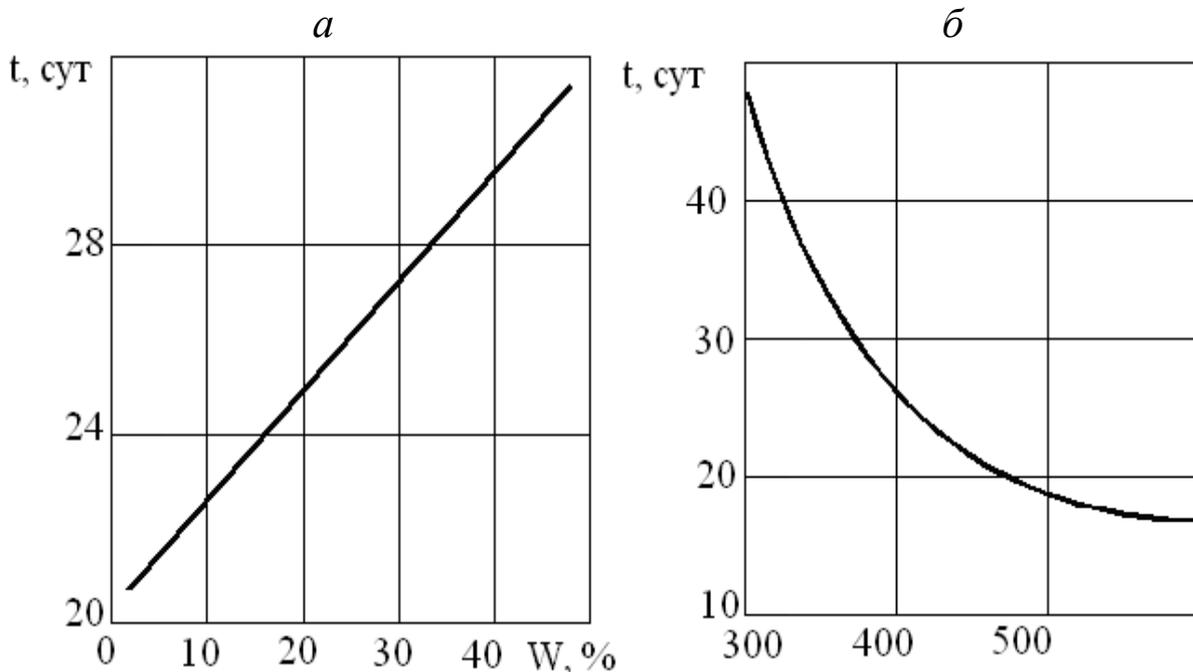


Рис. 3.6. Влияние влажности (*a*) и сорбционной активности угля (*б*) на продолжительность разогрева

Значительное влияние на процесс самовозгорания угля, аналогичное концентрации кислорода, оказывает химическая активность угля по отношению к кислороду. В процессе моделирования варьировалось значение предэкспоненциального коэффициента  $K$ . Данный коэффициент имеет смысл числа взаимодействий между молекулами кислорода и активными центрами угля. Обработка угля ингибиторами-антипирогенами обычно изменяет именно этот параметр из-за блокирующего действия образу-

щейся на его поверхности пленки, предотвращающей или затрудняющей проникновение молекул кислорода к реагирующим центрам угля, или дезактивации угля за счет взаимодействия с этими центрами. Изменение времени нагрева скопления до 423 К в зависимости от сорбционной активности угля приведено на рис. 3.6, б.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что снижение сорбционной активности угля по отношению к кислороду является мощным средством, позволяющим значительно замедлить или полностью предотвратить возникновение эндогенного пожара. Так снижение сорбционной активности в 2 раза увеличивает время достижения критической температуры в 3 раза. Зависимость времени разогрева угля от сорбционной активности угля можно описать уравнением

$$\tau = 13,743 \cdot 10^3 / K - 6,81, \quad (3.15)$$

где  $K$  – константа скорости окисления угля,  $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$ .

Однако при реализации данного способа предотвращения самовозгорания возникает ряд трудностей. Наибольшей является сложность равномерной обработки всех теряемых запасов угля. Кроме того, исследование показало, что нейтрализовать антипирогенное действие обработки может изменение других параметров, влияющих на процесс самовозгорания. Например, если снижение сорбционной активности угля сопровождается уменьшением скорости фильтрации воздуха через скопление, то суммарное воздействие изменения этих параметров может оказать меньшее профилактическое действие на процесс самовозгорания, чем изменение одного из них.

Кроме рассмотренных факторов, воздействие на которые широко применяется в практике предупреждения самовозгорания угля, следует рассмотреть и такой управляемый фактор, как начальная температура угля. Изменение температуры выработанного пространства может происходить при подаче инертных газов и антипирогенов, а также в случае применения хладагентов. Результаты исследования влияния начальной температуры угля на длительность процесса самовозгорания до заданной температуры приведены на рис. 3.7.

Полученные результаты показывают, что среди рассмотренных факторов, влияющих на процесс самовозгорания, снижение начальной температуры угля является наиболее эффективным средством предотвращения эндогенных пожаров. Например, уменьшение начальной температуры только в 1,024 раза (на 7 °С) увеличивает время развития процесса до заданной температуры в 3 раза. В случае если угольное скопление предварительно охлаждено на 10 °С (от 293 до 283 К), процесс самовозгорания, при прочих равных условиях, развития не получил. Максимальная температура угля, достигнутая на 250 сутки, равнялась 297 К. Время разогрева угля до условленной температуры в зависимости от начальной температуры скопления имеет вид

$$\tau = 1/(1,4847 - 421,29/T_0), \quad (3.16)$$

где  $T_0$  – начальная температура скопления угля, К.

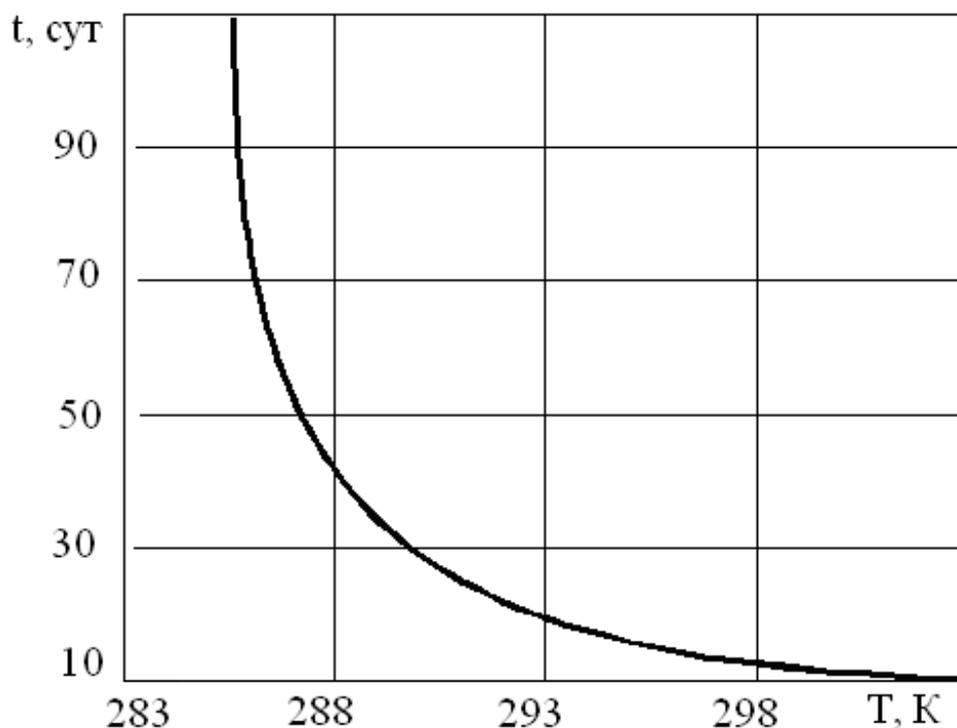


Рис. 3.7. Длительность самовозгорания в зависимости от начальной температуры угля

В ходе моделирования выяснилось, что величина критической начальной температуры угольного скопления, позволяющая

предотвратить развитие эндогенного пожара, зависит от свойств угля. В наибольшей степени изменить этот параметр и характер процесса самовозгорания может химическая активность угля. По мере повышения химической активности угля происходит снижение начальной критической температуры, позволяющей предотвратить самовозгорание окисляющегося материала.

Таким образом, проведенная оценка влияния различных факторов на процесс самовозгорания позволяет сделать следующие выводы.

1. В наибольшей степени на процесс самовозгорания влияет изменение начальной температуры угля. Поэтому целесообразно использовать для предупреждения эндогенных пожаров в шахтах снижение температуры скоплений угля в выработанном пространстве.

2. Отсутствуют абстрактные пожароопасные и пожаробезопасные значения параметров угольного скопления и фильтрующегося через него воздуха. Величина каждого из этих параметров соответствует конкретному угольному скоплению и определяется совокупностью его свойств и воздействием окружающей среды.

3. Совместное воздействие нескольких факторов, замедляющих процесс самовозгорания по отдельности, может как усилить, так и ослабить суммирующее профилактическое действие вносимых возмущений.

Исходя из полученных результатов, можно рекомендовать снижение температуры составов, используемых для предупреждения эндогенных пожаров, до минимально возможного значения. Это относится к жидким и твердым антипирогенам, а также к различным газовым смесям. При необходимости для охлаждения скоплений угля следует применять низкотемпературные хладагенты. Учитывая климатические условия России, целесообразно использовать зимний период для снижения температуры выработанного пространства с целью предупреждения эндогенных пожаров.

### **3.7. Эндогенная пожароопасность шахт**

Эндогенная пожароопасность угольных шахт зависит в основном от химической активности окисляющегося материала, а

также от горно-геологических и горнотехнических условий залегания и добычи полезного ископаемого, способствующих образованию разрыхленных скоплений угля и притоку к ним необходимого количества воздуха.

Химическая активность угля по отношению к кислороду зависит от многих факторов и изменяется в широких пределах. С увеличением степени метаморфизма углей их сорбционная активность уменьшается, что связано с уплотнением молекулярной структуры и уменьшением числа свободных радикалов, реагирующих с кислородом. В пределах одной степени метаморфизма угли также могут сильно отличаться по химической активности. Даже у одного пласта в отдельных слоях химическая активность может существенно изменяться. По падению пластов наибольшая активность часто наблюдается на глубине 50–100 м. На меньшей глубине она меньше вследствие выветривания. Углистые сланцы нередко обладают большей активностью, чем угли той же стадии метаморфизма.

У угля, длительное время находившегося в контакте с воздухом при постоянной температуре, т. е. окисленного, наступает снижение химической активности. Ускорение процесса окисления такого угля может быть достигнуто за счет смачивания, ведущего к расширению и раскрытию микротрещин и разрушению образовавшейся пленки. Сульфидные руды сорбируют кислород в присутствии воды, поэтому при увлажнении их удельная скорость поглощения резко увеличивается.

Важнейшими горно-геологическими факторами, влияющими на эндогенную пожароопасность шахт, являются: мощность пласта; угол залегания; сближенность пластов; тектоническая нарушенность; характер вмещающих пород; глубина залегания; петрографический, химический состав пласта. Чем больше мощность пласта, тем выше опасность возникновения процесса самовозгорания, так как увеличиваются потери угля в оставляемых целиках и нарушениях. Одновременно при отработке мощных пластов увеличивается воздухопроницаемость подработанных пород, что способствует доступу воздуха к теряемому углю.

С увеличением угла падения образуются концентрированные скопления разрыхленного угля, возникает аэродинамическая связь с поверхностью и затрудняется изоляция отработанной час-

ти пласта, что приводит к проветриванию выработанного пространства. При отработке сближенных пластов возникает аэродинамическая связь между отработанными пластами, что обеспечивает приток воздуха к скоплениям угля. В местах тектонических нарушений улучшается воздухопроницаемость угля и пород, образуются концентрированные потери угля и значительно возрастает его химическая активность.

Увеличение крепости породы в кровле обрабатываемого пласта приводит к ее обрушению крупными глыбами, что способствует фильтрации воздуха. Повышенная проницаемость вмещающих пород затрудняет изоляцию выработанного пространства, что также способствует притоку воздуха к углю и его самовозгоранию. Наблюдается рост эндогенной пожароопасности при увеличении глубины горных работ. Это связано с повышением температуры горных пород, что приводит к возрастанию химической активности угля, с ростом аварийности из-за растущего горного давления (при этом замедляется скорость отработки подготовленных запасов угля) и увеличением количества подаваемого в шахту воздуха.

Метанообильность угля также сказывается на развитии процесса самовозгорания. Так, при высоких скоростях выделения метана (более 0,04–0,05 мл/(г·ч)) окисления угля практически не происходит, так как кислород оттесняется от поверхности угля метаном. За счет десорбции метана может происходить снижение температуры угля. Однако теплота адсорбции метана составляет около 3 ккал/моль, что значительно меньше теплоты сорбции кислорода углем (67 ккал/моль).

С понижением интенсивности выделения метана скорость поглощения кислорода вначале возрастает, затем начинает снижаться. Скапливаясь в выработанном пространстве, метан инертизирует рудничную атмосферу, что уменьшает сорбцию кислорода. С другой стороны, высокая метанообильность угля приводит к необходимости увеличения подачи в шахту больших объемов воздуха, что вызывает рост прососов воздуха через выработанное пространство, в том числе через дегазированные скопления угля.

Главными горнотехническими факторами, влияющими на эндогенную пожароопасность, являются: способ вскрытия шахт-

ного поля; способ подготовки выемочных полей и блоков; система ведения очистных работ; система и режим вентиляции. Вероятность возникновения процесса самовозгорания снижается, если капитальные выработки проводятся по породам, обработка участков производится обратным ходом, пласты разделяются на изолированные участки. Большое значение имеет скорость ведения горных работ. С ее увеличением вероятность возникновения эндогенного пожара уменьшается.

## **4. ОБНАРУЖЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

### **4.1. Обнаружение пожаров в зданиях и сооружениях**

Для обнаружения пожара в зданиях и оповещения людей используют полуавтоматические и автоматические средства – извещатели. Автоматические пожарные извещатели в зависимости от импульса срабатывания подразделяются на тепловые, дымовые, световые, ультразвуковые и комбинированные. Тепловые извещатели срабатывают при повышении температуры окружающего воздуха выше критического значения (60, 80 и 100 °С). Время, через которое срабатывают тепловые извещатели после достижения критической температуры, около 1 мин, контролируемая площадь 30 м<sup>2</sup>. Эти извещатели являются приборами одноразового, дифференциального или максимально дифференциального действия.

Датчик одноразового действия имеет расчетную температуру плавления 72,5 °С и работает на разрыв электрической цепи. Тепловой извещатель дифференциального действия реагирует на скорость нарастания температуры окружающего воздуха за определенное время. Такие датчики применяют во взрывоопасных помещениях. Извещатель максимально дифференциального действия работает одновременно на повышение температуры и на достижение заданной критической температуры.

Дымовые извещатели реагируют на появление в воздухе дыма. В них используются два принципа обнаружения пожара: оптико-электронный, контролирующий изменение оптических свойств среды, и радиоизотопный, который регистрирует изме-

нение электропроводности ионизированной радиоактивным элементом межэлектродной среды при появлении частиц дыма. Время срабатывания дымовых извещателей – около 5 с, контролируемая площадь – 100 м<sup>2</sup>.

Световые извещатели основаны на обнаружении ультрафиолетового или инфракрасного излучения пламени методом фотоэффекта. Световые извещатели безынерционны и контролируют зону площадью до 600 м<sup>2</sup>.

Ультразвуковые извещатели улавливают колеблющееся пламя путем сравнения ультразвуковой частоты колебаний, отраженных от пламени и излучаемых извещателем. Частота колебаний, отраженных от движущихся поверхностей (пламя), меняется, что фиксирует извещатель. Контролируемая площадь ультразвукового извещателя до 1 000 м<sup>2</sup>.

Сигналы от извещателей передаются по сети на приемную станцию, которая сигналы тревоги передает в пожарную часть. На станции ведется круглосуточное дежурство персонала. Комбинированные извещатели реагируют одновременно на несколько параметров, например на появление тепла и дыма.

#### **4.2. Признаки рудничных пожаров и методы их обнаружения**

Безопасность горных работ и эффективность тушения рудничных пожаров в значительной степени зависит от своевременности их обнаружения. Своевременное выявление начальных признаков пожара позволяет быстро ликвидировать очаг с минимальными экономическими затратами. Одновременно снижается вероятность воздействия на шахтеров и горноспасателей, занятых ликвидацией аварии, опасных и вредных факторов развитого пожара.

Однако своевременное обнаружение пожаров в шахтах зачастую затруднено, так как их развитие, особенно пожаров эндогенного происхождения, обычно происходит в недоступных для людей и контрольной аппаратуры местах (в выработанном пространстве). В зависимости от особенности возникновения и протекания эндогенных и экзогенных пожаров, некоторые методы

используют только для обнаружения эндогенных или экзогенных пожаров, другие могут идентифицировать любые пожары.

Нагревание полезного ископаемого сопровождается выделением в окружающий воздух влаги как ранее содержащейся в угле, так и образующейся в процессе окисления (при низких температурах, около 50 °С, до 40 % прореагировавшего кислорода переходит в воду), поэтому в начальной стадии самонагрева происходит повышение влажности воздуха. Попадая в область более низких температур, пар конденсируется и образует туман. Часть пара конденсируется на поверхности перемычек, горных выработок. Эти явления используются для раннего обнаружения очагов самовозгорания.

Однако иногда образование мелкодисперсных частиц жидкости происходит без пожара, при перемешивании воздушных струй с различной температурой. По выделению пара, особенно после выпадения осадков, можно обнаружить очаги самовозгорания на породных отвалах, бортах разреза, угольных складах. Иногда выделение пара наблюдается на поверхности горных отводов шахт, когда эндогенный пожар находится недалеко от поверхности.

Белые налеты на стенках выработок появляются в результате окисления сернистого железа и перехода его в сульфат. Аналогичные налеты появляются на поверхности горящих породных отвалов. Кроме того, конденсируются на поверхности горящих отвалов, складов угля и различные смолы, появляющиеся при разложении угля.

Запахи тоже принадлежат к внешним признакам возникновения пожара. Образование в пожарных газах углеводородов предельного и непредельного ряда (пентан, гексан, этилен, бензол и др.) приводит к появлению специфического запаха, напоминающего нефтяные продукты (керосин и пр.). В случае горения проводов, конвейерной ленты и других изделий может возникнуть запах жженой резины. При нагревании древесины появляются запахи скипидара, муравьиной кислоты, дегтя. Для колчеданных рудников показателем пожара является запах сернистого ангидрида ( $\text{SO}_2$ ). Вслед за запахами может появиться дым.

Признаком пожара может стать и снижение концентрации кислорода в рудничном воздухе, приводящее к ощущению уду-

шья. К внешним признакам пожара относят и воспринимаемое кожей тепловое излучение, повышение температуры воздуха, рудничной воды, поверхности пород, угля, крепи.

Возникновение и развитие пожара сопровождается выделением из окисляющегося материала различных веществ (газы, влага, сажа), а также изменением физических свойств горючего вещества и окружающего пространства, что можно использовать для идентификации процесса горения. Все методы распознавания пожаров можно разделить на 4 группы:

1 – физиологические методы, основанные на обнаружении внешних признаков органами чувств (зрением, обонянием, ощущением и пр.) без специальных приборов и оборудования;

2 – химико-аналитические методы, устанавливающие признаки пожара путем химического анализа рудничного воздуха, рудничной воды на присутствие в них продуктов горения или термического разложения;

3 – минерало-геохимический метод, изучающий пожары по составу горных пород, путем наблюдения за вторичными минералами, образующимися при развитии окислительных процессов;

4 – физические методы предусматривают обнаружение пожаров с помощью приборов по физическим параметрам, зависящим от теплового состояния среды (температуры рудничного воздуха, воды и горных пород, влажности атмосферы, электрического сопротивления горных пород и пр.).

### **4.3. Газово-аналитический метод обнаружения подземных пожаров**

Газово-аналитический метод предусматривает непрерывный или периодический контроль за содержанием в рудничной атмосфере таких индикаторных газов, образующихся при горении, как оксид углерода, водород, предельные (этан, пропан, бутан) и непредельные углеводороды (этилен, пропилен, ацетилен и др.). Очаги самовозгорания в рудниках и шахтах можно обнаружить по увеличенному выделению радона. Переносные и стационарные газоанализаторы контролируют состав рудничной атмосферы как в действующих горных выработках, так и в изолирован-

ном выработанном пространстве (через воздуховыдающие скважины и газоотборные трубки в перемычках).

Для повышения эффективности обнаружения пожаров на всех выемочных полях для каждой лавы определяется фон индикаторных газов, так как они могут изначально содержаться в полезном ископаемом и вмещающих породах, а также образуются при низкотемпературном окислении угля и его механическом разрушении. Устойчивое нарастание концентрации индикаторных газов над фоновыми значениями свидетельствует о наличии процесса самовозгорания или очага горения.

Практика показывает, что контроль за газовым составом рудничной атмосферы в действующих выработках не всегда позволяет обнаружить очаги самовозгорания, возникающие в выработанном пространстве шахт, имеющих нагнетательный способ проветривания. При таком проветривании образующиеся в очаге газы выносятся по нарушенным горным породам на земную поверхность, минуя скважины, которые являются точками контроля. В последнее время получила распространение газовая съемка, проводимая на земной поверхности. Один из вариантов проведения такой съемки предусматривает пробивку скважин на земной поверхности глубиной около 1 м и определение в ней концентрации индикаторных газов.

Существенно упростить обнаружение подземных пожаров с земной поверхности позволяет надповерхностная газовая съемка. Способ включает замер содержания индикаторных газов в изолированном слое надповерхностного слоя атмосферного воздуха (рис. 4.1).

Для определения содержания пожарных газов в рудничной атмосфере применяется экспресс-метод с использованием химического газоопределителя ГХ, состоящего из aspirатора для прокачки воздуха и индикаторных трубок, содержащих реагент, изменяющий свой цвет при взаимодействии с оксидом углерода или другими газами. Объем воздуха, прокачиваемого aspirатором за один ход, равен  $100 \text{ см}^3$ . На поверхности трубки нанесены деления, соответствующие определенным концентрациям измеряемого индикатора, и по границе окрашенного слоя реагента оценивают содержание газа.

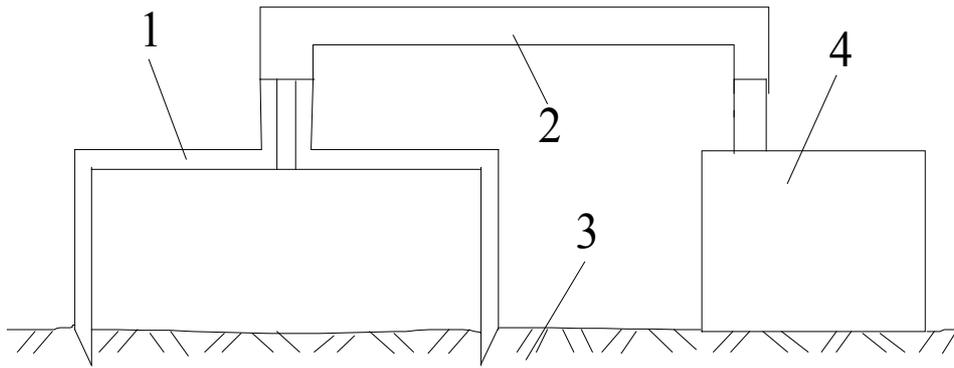


Рис. 4.1. Измерение состава надповерхностного воздуха в изолированном объеме: 1 – емкость; 2 – патрубок; 3 – поверхность; 4 – газоанализатор

Стационарная автоматическая шахтная аппаратура «Сигма СО», «СДОУ» предназначена для непрерывного определения оксида углерода в рудничном воздухе. Нижний порог чувствительности датчиков равен 0,0001 %, верхний диапазон измерений 0,009 %. Аппаратура устанавливается в горных выработках на исходящей из выемочного поля струе воздуха на расстоянии не более 200 м от точки контроля. Показания датчиков передаются по линии связи в диспетчерский пункт шахты, где регистрируются на ленте самописца.

Непрерывный контроль за содержанием газа метана, оксида углерода и скоростью воздуха в горных выработках шахты осуществляет стационарная система «Микон-1Р». В настоящее время существует и целый ряд переносных газоанализаторов рудничного исполнения, способных одновременно контролировать несколько газов. Широкий спектр пожарных газов с высокой точностью определяют в газоаналитических лабораториях, оснащенных хроматографами (ЛХМ, Цвет, Кристалл и пр.). Пробы отбирают в резиновые камеры и доставляют для анализа в лаборатории. Точное содержание большого количества индикаторных газов обычно определяют при обнаружении признаков самовозгорания, в случае контроля за очагами самонагрева или эндогенными пожарами, при оценке фоновых концентраций пожарных газов.

#### 4.4. Физические методы обнаружения пожаров

Физические методы предусматривают замер температуры воздуха и горных пород, измерение влажности, электрической проводимости и других параметров. Для замера температур горных пород и воздуха существует широкий выбор различных термометров, включающих как обычные контактные датчики (термопары, термосопротивления, жидкостные термометры), так и устройства дистанционного контроля температуры.

В последние годы получили распространение системы температурного контроля, использующие волоконно-оптические кабели. Температурные замеры позволяют эффективно обнаруживать очаги горения в горных выработках. Однако выявление очагов самовозгорания в выработанном пространстве этим методом малоэффективно по причине теплоизоляционных свойств угольных скоплений. Так, горные породы прогреваются вокруг очага всего на несколько метров. Не получили широкого распространения приборы дистанционного контроля температуры, закладываемые в выработанное пространство и передающие радиосигналы при повышении температуры.

Широкое распространение для обнаружения эндогенных пожаров на шахтах получили пирометры «Квант», «Радан», позволяющие бесконтактно замерять температуру. Их используют для контроля температуры поверхностей горных выработок с целью обнаружения очагов самовозгорания угля в целиках угля. Большую эффективность при обнаружении процессов самовозгорания полезных ископаемых показали тепловизоры. Особенно удобны эти приборы при обнаружении очагов пожаров на породных отвалах, складах угля и пр.

Учитывая стадию выпаривания влаги из угля при самонагревании, для обнаружения ранней стадии этого процесса применяют контроль за влагосодержанием воздуха. Вместо существовавшего ранее визуального наблюдения за влагосодержанием исходящего из выработанного пространства воздуха, в настоящее время измеряют содержание водяного пара во входящей и исходящей из контролируемого пространства струе воздуха. Недостатком данного способа является ограниченное его применение. Так, при начальной влажности воздуха около 100 % данный спо-

соб практически не работает. Известен способ обнаружения эндогенных пожаров, предусматривающий измерение электрического сопротивления воздуха. В случае уменьшения электрического сопротивления исходящей струи воздуха участок относят к пожароопасным.

Среди способов обнаружения и локализации очагов самовозгорания по изменению электрических свойств угля и вмещающих пород можно выделить способ, основанный на контроле за электропроводностью горных пород. Предполагаемый прямой замер электрического сопротивления может использоваться в основном на угольных разрезах. Большого распространения данный способ не получил, что может быть связано с колебаниями электрического сопротивления пород в широких пределах под воздействием других факторов, не связанных с самовозгоранием, например увлажнения.

Предлагался также способ поиска и локализации очагов самовозгорания с помощью радиоволн. Данный метод основан на способности радиоволн проникать в горные породы на определенную глубину, с последующим отражением радиосигнала на границе очага за счет изменения электрического сопротивления пород. На практике данный способ не применяется, возможно, из-за трудности отделить сигнал, отраженный очагом, от других сигналов, возникающих, например, на границе пород с различным электрическим сопротивлением.

В последнее время разрабатывается способ обнаружения и локализации очагов самовозгорания по изменению электрического потенциала на поверхности. Возникновение электрических полей в данном случае происходит за счет температурной неоднородности в очаге, способствующей термодиффузии заряженных дефектов.

Одним из наиболее эффективных средств обнаружения очагов возгорания на конвейерных лентах являются тепловые датчики линейного типа. Преимуществом таких устройств является возможность обнаружения очага загорания на всем протяжении кабеля специальной конструкции. В качестве линейных тепловых датчиков используют резистивный кабель КТЧС(с)390, устройства «Алармлайн», «Протектовэйр». Температура срабатывания таких устройств может быть различной, и при появлении очага ка-

бель-извещатель определяет расстояние до места с повышенной температурой.

Перспективным для раннего обнаружения пожаров на ленточных конвейерах является комплекс ОПК, позволяющий непрерывно контролировать распределение температуры вдоль конвейера с помощью волоконно-оптического термокабеля. В комплексе ОПК используется метод регистрации амплитуды антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния света с разделением каналов во временной области. Оптическое излучение от маломощного лазерного источника с длиной волны 0,9 мкм и длительностью импульсов 100 нс поступает в волоконно-оптический кабель. Пиковая оптическая мощность в оптическом волокне не более 1 Вт, средняя мощность не более 0,1 мВт.

При распространении излучения по кабелю оно частично рассеивается, в том числе в обратном направлении. Амплитуда обратного рассеивания пропорциональна абсолютной температуре, если выделить из спектра рассеянного излучения область длин волн вблизи 0,87 мкм, что соответствует антистоксовой компоненте рассеяния в материале световода (плавленом кварце). Отфильтрованное излучение поступает на фотоприемник, которым служит кремниевый лавинный фотодиод. Разделение каналов по дальности осуществляется с учетом временной задержки относительно излученного лазерного импульса.

Волоконно-оптический термокабель монтируется в горной выработке вдоль конвейерной линии и преобразует температуру окружающей среды в оптический сигнал. Контроль температуры воздушной среды осуществляется в пределах от  $-30$  до  $+95$  °С. Диапазон установок предупредительного порога  $25-60$  °С, аварийного порога  $40-80$  °С. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности  $\pm 3$  °С. Минимальный отрезок времени для определения скорости нарастания температуры равен 180 с. Длина термокабеля 1 000 м. Исполнение комплекса АПК – рудничное взрывозащищенное. Специальный вид взрывозащиты блока контроля обеспечивается применением лазерного излучателя ЛПИ-12 с фотобезопасным уровнем лазерного излучения. Комплекс рассчитан для работы: в макроклиматическом районе по ГОСТ 15150-69-УХЛ в зонах умеренного и холодного климата при температурах  $5-35$  °С для блока контроля БК1; в подземных

условиях угольных шахт, разрабатывающих пласты, опасные по газу или пыли, категория размещения 5 по ГОСТ 15150–69.

#### 4.5. Оценка температуры очагов самовозгорания

При выборе наиболее эффективного способа, оборудования и тактики тушения подземных пожаров необходимо знать температуру очага. Однако наибольшее количество самовозгораний угля в шахтах происходит в недоступной части выработанного пространства, где замеры температуры практически невозможны. Существуют методики оценки температуры недоступных очагов самовозгорания или их стадий по соотношению пожарных газов. Основанием применения этих методик является различная зависимость интенсивности выделения пожарных газов при повышении температуры очага самовозгорания. Так, установлено, что для оценки температуры очага до 100 °С можно применять соотношение окиси углерода к этилену, а свыше 100 °С отношение этилена к ацетилену.

Среди различных соотношений, предложенных для оценки состояния очага подземного пожара, можно выделить соотношения  $N_2/(CO+CO_2)$ ,  $C/H$ ,  $CO/O_2$ ,  $CO/CO_2$ . В некоторых странах для контроля за самовозгоранием используют коэффициенты Грехема, представляющие соотношения прироста концентраций оксида углерода и двуокиси углерода к убыли кислорода, а также отношение прироста окиси углерода к двуокиси углерода.

Для оценки температур очагов самовозгорания предложено также использовать отношение концентраций оксида углерода к водороду. Например, при нагреве угля от 20 до 300 °С это отношение увеличивается от 1 до 400. При возникновении процесса пламенного горения угля отношение концентраций этих газов резко падает, становясь равным фоновому. Однако в этом случае концентрации пожарных газов намного выше фонового значения.

Исследования состава газов, выделяющихся из угля при нагревании, с помощью масс-спектрометра показали, что по содержанию веществ, обладающих запахом (одоранты), можно ориентировочно определять температуру угля. Например, бензол обнаруживается при температуре не ниже 20 °С, ксилол – 100 °С, аллиловый спирт – 150 °С.

Широкого распространения все эти методики не получили. Это связано с тем, что свойства и характер выделения индикаторных газов значительно меняются для различных марок угля, месторождений и даже в пределах одного шахтопласта.

Оценивать температуру очагов самовозгорания в выработанном пространстве можно по суммарному содержанию в исходящей струе воздуха водяного пара и аэрозолей воды. Так, вначале поступающий воздух нагревается в очаге самонагревания, и его относительная влажность уменьшается, стимулируя испарение влаги из угля и пород. В результате испарения и химических реакций, протекающих с образованием молекул воды, влагосодержание воздуха возрастает. Пройдя очаг самонагревания, прогретый воздух быстро остывает в выработанном пространстве до естественной температуры угля и вмещающих пород за счет развитой поверхности скоплений горных пород. Этот процесс сопровождается увеличением относительной влажности воздуха до 100 % с последующей конденсацией избытка влаги, выделившейся из разогретого угля.

Образующаяся жидкая фаза находится во взвешенном состоянии в виде мелкодисперсной аэрозоли. В результате исходящий поток воздуха, так же как и входящий, будет иметь относительную влажность близкую к 100 % и естественную температуру горных пород. В этом случае влагосодержание воздуха после прохождения через разогретый уголь не изменится, но в нем появится жидкая фаза, нередко наблюдаемая в шахтах.

Учитывая данное явление, можно использовать влагосодержание и количество содержащейся в воздухе жидкости, находящейся в виде мелкодисперсной аэрозоли, не только для обнаружения самовозгорания, но и для оценки температуры очагов.

Проведенные расчеты показывают, что количество жидкой фазы в воздухе, прошедшем разогретый уголь, может существенно превышать количество содержащегося в нем пара. Влияние температуры очага самонагревания на соотношение количества жидкой фазы и пара в воздухе после его охлаждения приведено на рис. 4.2. В данном случае при нагреве воздух насыщался парами воды до относительной влажности 100 %. Соотношение жидкой фазы и пара рассматривалось после остывания воздуха до температуры 15 °С. Из приведенных данных видно, что после

прохождения скопления угля с температурой более 60 °С количество образовавшегося жидкого аэрозоля в остывшем воздухе может в десятки раз превышать количество оставшегося пара.

При обосновании способа оценки температуры очага самонагрева по количеству сконденсировавшейся жидкости необходимо учесть, что давление насыщенного водяного пара в воздухе зависит от температуры и может быть определено по формуле

$$P_p = P_1 e^{-L/(RT)}, \quad (4.1)$$

где  $P_1$  – постоянная;  $L$  – удельная теплота парообразования, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – термодинамическая температура, К.

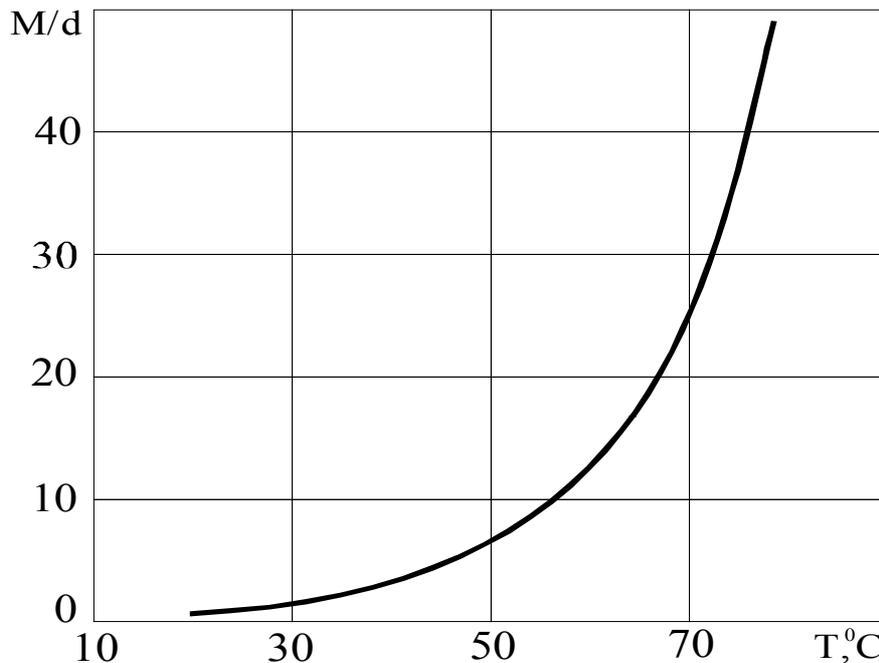


Рис. 4.2. Влияние температуры очага на соотношение жидкой фазы (M) и пара (d) в охлажденном воздухе

При условии, что в очаге самонагрева все количество сконденсировавшейся в точке контроля жидкости находилось в виде пара при влажности 100 %, имеем следующее выражение для определения температуры разогретого угля:

$$T = \frac{L}{R \ln \left[ \frac{P_1 (K_i + 0,622)}{K_i P_0} \right]}, \quad (4.2)$$

где  $K_i$  – суммарное количество пара и жидких аэрозолей в исходящем из выработанного пространства воздухе, кг/кг;  $P_0$  – барометрическое давление воздуха, Па.

При использовании способа необходимо учесть, что реальная температура самонагревания может быть выше расчетной за счет потери части жидкой фазы при движении через выработанное пространство. Аналогичный результат появится и в случае, когда относительная влажность воздуха при прохождении через очаг самонагревания будет меньше 100 %. Подсчет по формуле (4.2) позволяет установить нижний предел температуры очага самонагревания.

Для определения количества взвешенной жидкости в воздухе целесообразно использовать различные сорбенты, например силикагель. В этом случае рудничный воздух пропускают через емкости с осушающим веществом, а затем их взвешивают.

Оценить температуру подземного очага можно по величине аномалии пожарных газов (оксид углерода, водород), образующейся на земной поверхности. Расположение в выработанном пространстве в определенном порядке легкоплавких капсул (имеющих неодинаковую температуру плавления) с различными ароматическими или легкоконтролируемыми веществами, не специфическими для шахты, также позволит оценить температуру пожара.

Для обнаружения очагов эндогенных пожаров и определения их температуры опробован способ, предусматривающий запуск в выработанное пространство газа, окисляющегося при прохождении очага и изменяющего свою химическую формулу. В случае запуска в вентиляционную струю мелкодисперсных веществ, имеющих различную температуру разложения, появляется возможность оценить температуру очага.

#### 4.6. Определение местонахождения очагов пожара в выработанном пространстве

Небольшие размеры очагов самовозгорания, возникающих в значительных объемах выработанного пространства, недоступных для людей, существенно осложняют определение их местонахождения. Среди применяемых на практике можно выделить способ обнаружения и определения местонахождения очагов пожаров в выработанном пространстве, основанный на измерении суммарной депрессии естественной и тепловой тяг в контрольных скважинах, пробуренных в пожарный участок с земной поверхности. Однако широкого распространения способ не получил из-за трудоемкости (необходимо большое число скважин и возведение перемычек в горных выработках) и опасности образования скопления горючих газов при остановке вентиляторов проветривания.

Отсутствие данных о путях фильтрации газа не позволяет установить местонахождение эндогенных пожаров, возникающих в выработанном пространстве, при обнаружении пожарных газов в исходящей из участка струе газа. Для локации подземных пожаров широко используется приповерхностная или надповерхностная газовые съемки. Практика показала, что образующиеся на земной поверхности газовые аномалии (рис. 4.3) обычно являются вертикальной проекцией очага, по которым удастся не только обнаружить процесс самовозгорания, но и определить местонахождение пожара. Формирование газовой аномалии в горных породах от подземного очага пожара G с образованием повышенного содержания пожарных газов в приповерхностном слое земной поверхности (линия EF) приведено на рис. 4.3. В качестве индикаторных газов при локации подземных очагов самовозгорания обычно используют оксид углерода, водород и радон.

Приповерхностную газовую съемку проводят путем измерения концентрации пожарных газов или радона в шпуре, пробитом в верхнем слое почвы. Глубина шпура составляет от 0,5 до 1 м, диаметр около 20 мм. Для выявления газовых аномалий поверхность над предполагаемым очагом подземного пожара разбивают сеткой с шагом 10–20 м и в узлах сетки пробивают скважины с последующим замером концентрации пожарных газов.

После окончания замеров на плане поверхности строится изолинии концентраций, и под точкой с наибольшей концентрацией индикаторного газа располагается очаг пожара. Для ускорения выявления эпицентра газовой аномалии разработан способ газовой съемки, предусматривающий определение величины градиента концентрации из контрольной точки по всем направлениям. Затем замер продолжается в направлении максимального градиента концентрации до выявления эпицентра аномалии (рис. 4.4).

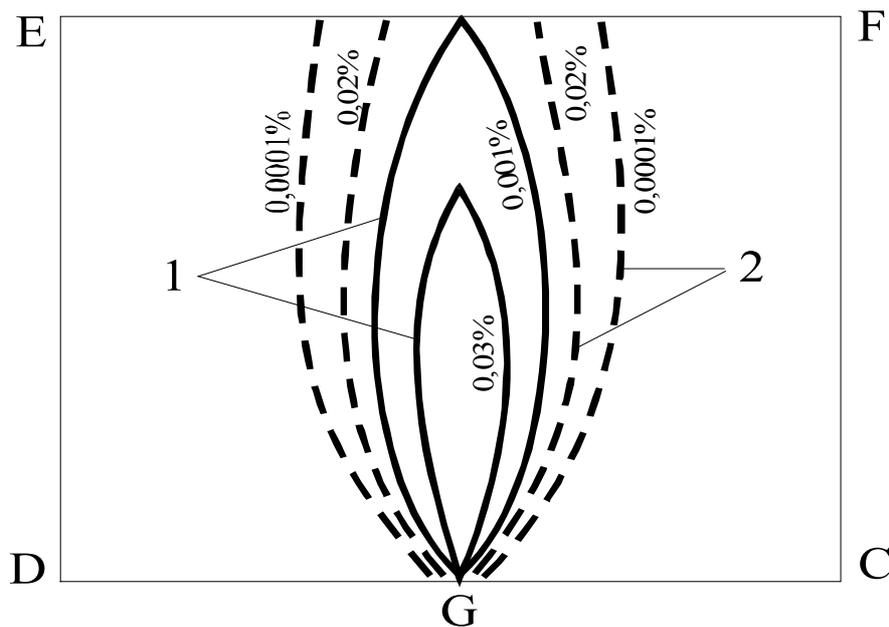


Рис. 4.3. Распределение концентрации газа в горных породах: 1 – в момент выхода газа на поверхность; 2 – стационарная газовая аномалия

Добавка к углю индикаторных добавок, выделяющих при нагревании летучие компоненты, неспецифичные для рудничной атмосферы, может быть одним из эффективных способов обнаружения и локации очагов самовозгорания угля. Так, разбивка опасных по самовозгоранию областей на отдельные сектора и введение в каждый из них различных индикаторных добавок позволит определять с необходимой точностью местонахождение очага. Этой цели можно добиться и с помощью одного индикатора, если известен путь и скорость распространения индикатора в выработанном пространстве. Зная температуру, при которой происходит интенсивное выделение летучего индикатора, можно

оценить стадию развития очага самовозгорания (для упрощения это могут быть ароматические вещества).

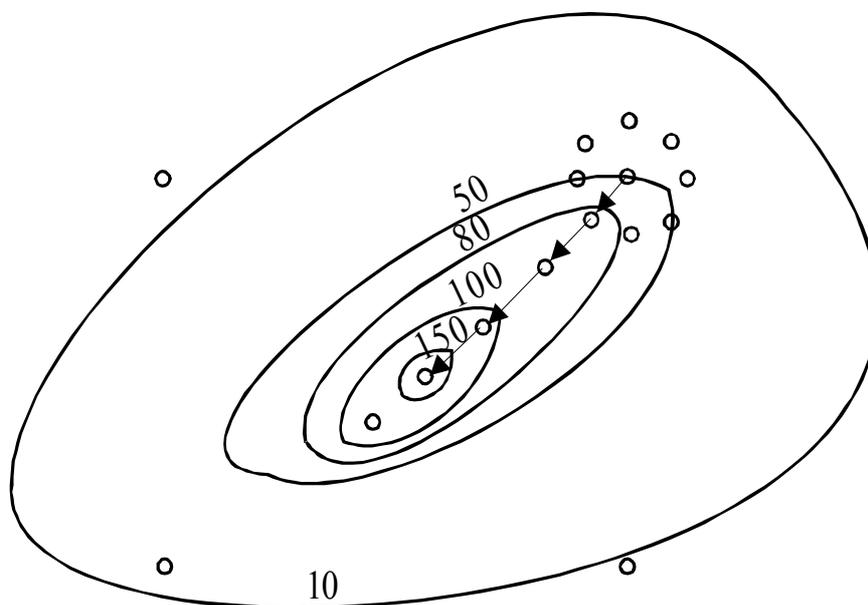


Рис. 4.4. Определение эпицентра газовой аномалии по градиенту концентрации индикаторного газа

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что для обнаружения и локации очагов самовозгорания угля на ранних стадиях развития нецелесообразно применение легкокипящих жидкостей, например жидкого хладона 114В2. Наиболее эффективной добавкой, позволяющей фиксировать нагрев угля, могут быть микрокапсулированные жидкости, кипящие при температуре, соответствующей начальным стадиям процесса самовозгорания. В качестве носителей микрокапсул в выработанном пространстве может использоваться пена. Добавка микрокапсул существенно увеличивает стойкость и кратность пены, что способствует росту объема, заполняемого индикаторной добавкой.

## 5. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ РУДНИЧНЫХ ПОЖАРОВ

### 5.1. Защита поверхностных зданий и сооружений

Противопожарная защита поверхностных зданий и сооружений предусматривает следующие мероприятия:

1 – соблюдение безопасного расстояния между промышленными сооружениями и жилыми зданиями;

2 – устройство разрывов между зданиями и сооружениями, препятствующих распространению пламени. Так, при расстоянии между сооружениями 70 м вероятность распространения пожара равна 2 %, при расстоянии 40 м – 9 %, при 20 м – 27 %, при 10 м – 66 %, а при расстоянии 5 м – 87 %. Для зданий 1-й и 2-й степени огнестойкости плотность застройки должна быть не более 30 %, зданий 3-й степени – 20 % и зданий 4-й и 5-й степени – не более 10 %;

3 – обеспечение проезда и подъезда к зданиям и сооружениям пожарного транспорта;

4 – установку в зданиях и сооружениях противопожарных стенок, перегородок, перекрытий, ворот, люков и др. Предел огнестойкости этих преград должен быть не менее 2,5 ч;

5 – обеспечение объектов средствами связи и пожарной сигнализацией;

6 – обеспечение зданий и сооружений средствами пожаротушения.

При проектировании и строительстве зданий необходимо предусмотреть пути эвакуации работающих. Здания и сооружения должны быть снабжены устройствами для удаления дыма при пожаре, к числу которых относятся аэрационные фонари, специальные дымовые люки и др. Противопожарную защиту поверхностных технологических комплексов обеспечивает сооружение пожарного водоема и склада противопожарных материалов, устройство насосной станции и утепленных пожарных трубопроводов.

Обеспечение пожарной безопасности в организациях всех отраслей экономики и индивидуальными предпринимателями производится в соответствии с «Правилами пожарной безопасности в РФ 01-03», утвержденными приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313 (далее ППБ 01-03).

На каждом объекте должны быть разработаны и утверждены руководителем организации инструкции о мерах пожарной безопасности для каждого взрывопожароопасного и пожароопасного участка. Руководители организации могут назначать лиц, обеспечивающих выполнение ППБ. Для предупреждения и борь-

бы с пожарами могут создаваться пожарно-технические комиссии и добровольные пожарные формирования. Все работники организаций должны допускаться к работе только после прохождения противопожарного инструктажа.

Руководители и должностные лица, ответственные за обеспечение пожарной безопасности, по прибытии к месту пожара должны:

- сообщить о пожаре в пожарную охрану, руководству и дежурным службам объекта;
- при угрозе жизни организовать спасение людей;
- проверить включение в работу автоматических систем противопожарной защиты;
- при необходимости отключить электроэнергию (кроме противопожарной защиты), остановить работу транспортирующих агрегатов, аппаратов, перекрыть сырьевые, газовые, паровые и водяные коммуникации, остановить вентиляцию;
- прекратить все работы в здании (если это допускает технология), кроме тушения;
- удалить из опасной зоны всех людей, не занятых тушением пожара;
- осуществлять общее руководство тушением до прибытия пожарной охраны;
- обеспечить соблюдение требований безопасности работниками, принимающими участие в тушении;
- сообщать прибывшей пожарной охране сведения о имеющихся на объекте опасных, взрывчатых веществах.

В каждой организации должен быть установлен соответствующий их пожарной опасности режим, в том числе:

- определены и оборудованы места для курения;
- определены места и допустимое количество одновременно находящегося в помещениях сырья, полуфабрикатов и готовой продукции;
- установлен порядок уборки горючих отходов и пыли, хранения промасленной одежды;
- определен порядок обесточивания электрооборудования в случае пожара и по окончании рабочего дня;
- регламентированы:

- порядок проведения временных огневых и других пожароопасных работ;
- порядок осмотра и закрытия помещений после окончания работы;
- действия работников при обнаружении пожара;
- порядок и сроки прохождения противопожарного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму.

В зданиях и сооружениях при одновременном нахождении на этаже более 10 человек должны быть вывешены на видных местах планы эвакуации людей при пожаре и предусмотрена система оповещения людей при пожаре. На объектах массового пребывания людей (50 и более человек) дополнительно должна быть разработана инструкция действия персонала по обеспечению безопасной и быстрой эвакуации, по которой не реже одного раза в полугодие проводятся тренировки. Во всех помещениях должны быть вывешены таблички с номерами телефона для вызова пожарной охраны.

В зданиях и сооружениях организаций запрещается:

- хранить и применять в подвалах и цокольных этажах легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, взрывчатые вещества, баллоны с газом, товары в аэрозольной упаковке и другие пожароопасные материалы, кроме случаев, оговоренных в действующих нормативных документах;
- использовать чердаки, технические этажи, венткамеры и другие технические помещения для организации производственных участков, мастерских, для хранения продукции, мебели, оборудования и других предметов;
- размещать в лифтовых холлах кладовые, ларьки, киоски и т. п.;
- устраивать склады горючих материалов и мастерские, размещать иные хозяйственные помещения в подвалах, цокольных этажах, если вход в них не изолирован от общих лестничных клеток;
- проводить уборку помещений и стирку одежды с применением бензина, керосина и других легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, а также отогревать замерзшие трубы паяльными лампами и другим открытым огнем;

– оставлять неубранным промасленный обтирочный материал;

– устанавливать глухие решетки на окнах и приямках у окон подвалов, за исключением случаев, специально оговоренных в нормах, утвержденных в установленном порядке. Металлические решетки, защищающие приямки, должны открываться, а запоры на окнах открываться изнутри без ключа;

– устраивать на лестничных клетках и поэтажных коридорах кладовые, хранить вещи, мебель и другие горючие материалы.

В инструкции о мерах пожарной безопасности необходимо отражать следующие вопросы:

– порядок содержания территории, зданий и помещений, в том числе эвакуационных путей;

– мероприятия по обеспечению пожарной безопасности при проведении технологических процессов, эксплуатации оборудования, производстве пожароопасных работ;

– порядок и нормы хранения и транспортирования взрывопожароопасных и пожароопасных веществ и материалов;

– места курения, применения открытого огня и проведения огневых работ;

– порядок сбора, хранения и удаления горючих веществ и материалов, содержания и хранения спецодежды;

– предельные показания контрольно-измерительных приборов, отклонения которых могут вызвать пожар или взрыв (термометры, манометры и т. п.);

– обязанности и действия работников при пожаре, в том числе:

- правила вызова пожарной охраны;
- порядок аварийной остановки технологического оборудования;

- порядок отключения вентиляции и электрооборудования;

- правила применения средств пожаротушения и установок пожарной автоматики;

- порядок эвакуации горючих веществ и материальных ценностей;

- порядок осмотра и приведения в пожаровзрывобезопасное состояние всех помещений предприятия.

**Оснащение помещений первичными средствами пожаротушения.** Вид и количество первичных средств пожаротушения зависит от физико-химических и пожароопасных свойств горючих веществ, их отношения к огнетушащим веществам, площади помещений. Комплектование технологического оборудования огнетушителями определяется требованиями технических условий (паспортов) на это оборудование или правилами пожарной безопасности. В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух ручных огнетушителей. Огнетушители, отправленные на перезарядку, должны заменяться на равнозначные.

При защите помещений ЭВМ, музеев, архивов и т. п. следует учитывать специфику взаимодействия огнетушащих веществ с защищаемыми материалами, изделиями. Данные помещения следует оборудовать хладоновыми и углекислотными огнетушителями с учетом предельно допустимой концентрации огнетушащего вещества. Помещения, оборудованные автоматическими стационарными установками пожаротушения, обеспечиваются огнетушителями на 50 %, исходя из расчетного количества. Нормы оснащения помещений ручными огнетушителями приведены в табл. 5.1, а передвижными огнетушителями в табл. 5.2. Для пожаров класса А применяют порошок АВС(Е); для классов В, С, Е – порошок ВС(Е) или АВС(Е); для класса D – порошок D. Знаком «++» в таблицах обозначены рекомендуемые к оснащению объектов огнетушители, знаком «+» – допустимые при отсутствии рекомендуемых, а знаком «-» огнетушители, не допустимые для оснащения данных объектов.

Применяемые огнетушители делятся на переносные (массой до 20 кг) и передвижные (массой от 20 до 400 кг). В зависимости от используемого огнетушащего вещества огнетушители разделяют на следующие типы:

- 1) водные (**ОВ**);
- 2) пенные, которые делятся:
  - на химические пенные (**ОХП**);
  - воздушно-пенные (**ОВП**);
- 3) порошковые (**ОП**);
- 4) газовые, которые делятся:
  - на углекислотные (**ОУ**);

- хладоновые (ОХ);  
5) комбинированные.

Таблица 5.1

## Нормы оснащения помещений ручными огнетушителями

Категория помещения	Пределная защищаемая площадь, м <sup>2</sup>	Класс пожара	Пенные и водные огнетушители вместимостью 10 л	Порошковые огнетушители вместимостью, л (кг)			Хладоновые огнетушители вместимостью 2 (3) л	Углекислотные огнетушители вместимостью, л (кг)	
				2(2)	5(4)	10(9)		2(2)	5(8) или 3(5)
А, Б, В	200	А	2++	–	2+	1++	–	–	–
		В	4+	–	2+	1++	4+	–	–
		С	–	–	2+	1++	4+	–	–
		Д	–	–	2+	1++	–	–	–
		Е	–	–	2+	1++	–	–	2++
В	400	А	2++	4+	2++	1+	–	–	2+
		Д	–	–	2+	1++	–	–	–
		Е	–	–	2++	1+	2+	4+	2++
Г	800	В	2+	–	2++	1+	–	–	–
		С	–	4+	2++	1+	–	–	–
Г, Д	1800	А	2++	4+	2++	1+	–	–	–
		Д	–	–	2+	1++	–	–	–
		Е	–	2+	2++	1+	2+	4+	2++
Общественные здания	800	А	4++	8+	4++	2+	–	–	4+
		Е	–	–	4++	2+	4+	4+	2++

Водные огнетушители следует применять для тушения пожаров класса А. Запрещается применение таких огнетушителей для ликвидации пожаров на оборудовании, находящемся под электрическим напряжением, высокотемпературных очагов. Так, огнетушитель водный ОВ-5 содержит баллон объемом 5 л с содержанием 4,5 кг воды, время ее выхода 20 с, длина струи 6–8 м. Диапазон температур, при которых можно использовать водный огнетушитель, от +2 до +50 °С.

Таблица 5.2

**Нормы оснащения помещений  
передвижными огнетушителями**

Категория помещения	Предельная защищаемая площадь, м <sup>2</sup>	Класс пожара	Воздушно-пенные огнетушители вместимостью 100 л	Комбинированные огнетушители (пена, порошок) вместимостью 100 л	Порошковые огнетушители вместимостью 100 л	Углекислотные огнетушители вместимостью, л	
						25	80
А, Б, В	500	А	1++	1++	1++	–	3+
		В	2+	1++	1++	–	3+
		С	–	1+	1++	–	3+
		Д	–	–	1++	–	–
		Е	–	–	1+	2+	1++
В, Г	800	А	1++	1++	1++	4+	2+
		В	2+	1++	1++	–	3+
		С	–	1+	1++	–	3+
		Д	–	–	1++	–	–
		Е	–	–	1+	1++	1+

Огнетушители химические пенные (ОХП) содержат химические вещества, взаимодействие которых приводит к образованию пены. Огнетушители используют для тушения горючих жидкостей, пожаров класса **А** и **В**. Например, огнетушитель ОХП-10 имеет массу заряда 8,7 кг, время подачи пены 55 с, длина струи пены не менее 4 м, диапазон рабочих температур от +5 до +45 °С. При использовании огнетушителя не допускать попадания пены на кожу, глаза. Нельзя использовать пенные огнетушители для тушения электрооборудования, находящегося под напряжением.

Огнетушитель воздушно-пенный содержит водный раствор пенообразующих добавок, который при движении эжектирует воздух, в результате чего образуется воздушно-механическая пена. Огнетушители используют для тушения горючих жидкостей, пожаров класса **А** и **В**. Огнетушитель воздушно-пенный ОВП-10,01 имеет объем корпуса 10 л с массой заряда 9,5 кг. Время выхода пены 45 с, длина струи 3,5 м, диапазон рабочих темпе-

ратур от +5 до +45 °С. При использовании не допускать попадания пены на кожу, глаза.

Огнетушители порошковые предназначены для тушения горючих жидкостей, твердых веществ и электроустановок, находящихся под напряжением до 1 000 В. Не допускать попадания порошка на кожу, глаза. Характеристики порошковых огнетушителей приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

## Характеристики порошковых огнетушителей

Параметр	Тип огнетушителя			
	ручной огнетушитель ОПУ-2	ручной огнетушитель ОПУ-5	ручной огнетушитель ОП-5(3)	передвижной огнетушитель ОП-100
Время выхода порошка, с	8	15	не менее 10	45
Длина струи порошка, м	не менее 4	не менее 5	не менее 3,5	45
Диапазон температур, °С	от -50 до +50	от -50 до +50	от -40 до +50	от -40 до +50
Масса порошка, кг	2	5	3	85

Огнетушители ручные углекислотные выпускают с объемом баллонов 2, 3, 5, 6, 8 л для тушения транспортных средств, пожаров в музеях, библиотеках, домах, в электроустановках с напряжением до 1 000 В. При использовании углекислотных огнетушителей необходимо учитывать, что температура раструба и корпуса пускового устройства понижается до  $-60 \div 70$  °С. Так, ручной углекислотный огнетушитель ОУ-2 имеет баллон объемом 2 л с массой заряда 1,4 кг. Время выхода заряда 8 с, длина струи при температуре 20 °С около 1,5 м, диапазон температур от -40 до +50 °С.

Передвижной углекислотный огнетушитель ОУ-10 имеет баллон объемом 10 л с массой заряда 7 кг. Время выхода заряда 15 с, диапазон температур от -40 до +50 °С. Масса заряженного огнетушителя 30 кг.

Огнетушители хладоновые (ОХ) содержат галоидированные углеводороды (бромистый этил, бромистый метилен, тетрафтор-

дибромэтан и др.) и предназначены для тушения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, твердых веществ, электроустановок под напряжением. Так, огнетушитель ручной аэрозольный хладоновый ОАХ с объемом баллона 2 л содержит массу заряда 1,4 кг. Время выхода заряда 8 с, длина струи 1,5 м, диапазон температур от  $-40$  до  $+50$  °С.

Самосрабатывающие огнетушители (ОСП) предназначены для тушения без участия человека загораний твердых и жидких веществ, электрооборудования. ОСП представляет собой герметичный сосуд, заполняемый огнетушащим порошком и специальным веществом – газообразователем, и может использоваться вместо переносных огнетушителей или дополнительно к ним. Он устанавливается над местом возможного загорания и срабатывает автоматически при повышении температуры. Например, огнетушитель ОСП-1 имеет массу 1 кг, защищает объем около  $5 \text{ м}^3$ , температура срабатывания  $100$  °С, температура эксплуатации от  $-50$  до  $+50$  °С.

## **5.2. Снижение пожарной опасности шахтной деревянной крепи**

Для снижения пожароопасности горных выработок, закрепленных деревянной или комбинированной крепью, применяют специальные огнезащитные составы – антипирогены (соли аммония, бромистый аммоний, хлористый цинк, борная кислота, бура, жидкое стекло и др.). Одни используют для пропитки древесины водными растворами, другие (более перспективные) наносят на поверхность. Исследованиями установлено, что по эффективности, стоимости и технологичности наиболее приемлемыми являются обмазки на основе жидкого стекла. В качестве наполнителей к основным компонентам добавляют асбест, вермикулит, шлаковату, каолин и др. Так, вермикулит увеличивает свой объем в 20–25 раз при нагреве до  $300$ – $800$  °С.

Результаты экспериментов по горению (рис. 5.1) показали, что убыль массы необработанного образца древесины составила 70 % через 8 мин. Образец, пропитанный в течение 48 ч в растворе фосфорнокислых и сернокислых солей аммония, потерял за это время 32 % массы. Образцы, обработанные методом обмазки,

потеряли только 12 % массы. Контрольный образец сгорает за 12 мин, а обработанный за 32 мин.

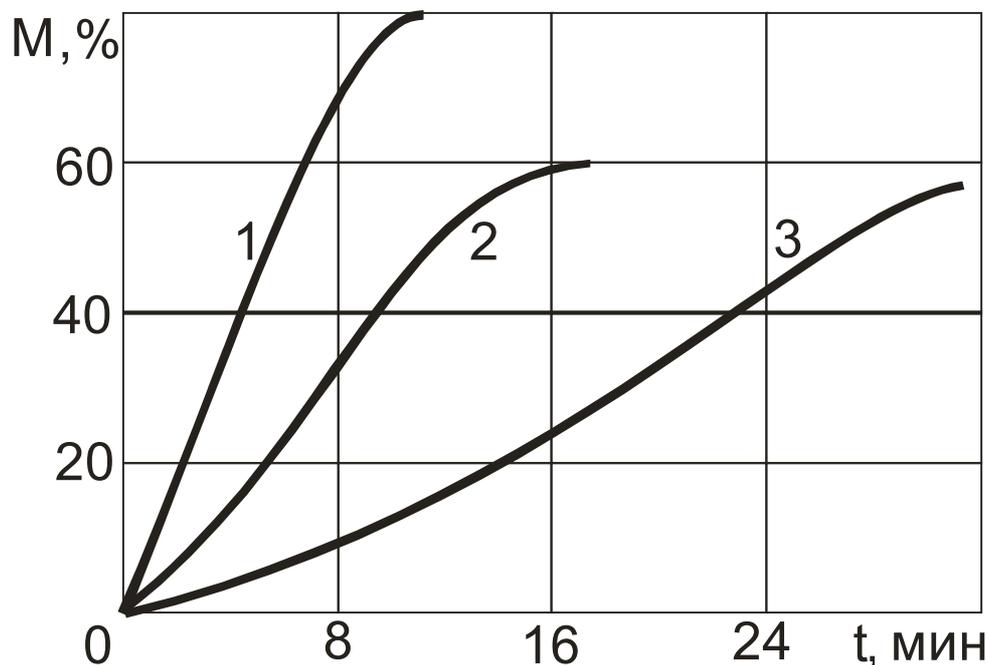


Рис. 5.1. Изменение потери массы древесины при горении: 1 – контрольный (необработанный) образец; 2 – образец, пропитанный антипирогеном; 3 – образец, покрытый антипирогеном

Используется следующий состав для обмазки древесины: смесь 10 массовых частей жидкого стекла и 1–2 массовых частей коротковолокнистого порошкового асбеста. На покрытие 1 м<sup>2</sup> древесины расходуется 2,5–3 кг огнезащитного состава. Разработана также смесь: каолин – 20–25 % по массе; смола марки МФФМ – 3–5 %; окись магния – 2–3 %; жидкое стекло – до 100 %. Норма расхода при нанесении в 2 слоя – 2 кг на 1 м<sup>2</sup>. Перед нанесением состава крепь очищается от смолы, щепы, грязи, породной и угольной пыли. Для набрызгивания состава разработана передвижная установка, а также переносной аппарат с баллоном на 25 л.

### 5.3. Шахтные пожарно-оросительные сети и противопожарные двери

Пожарно-оросительное водоснабжение является основным элементом противопожарной защиты шахт. Опыт ликвидации аварий показывает, что там, где в момент возникновения пожара была обеспечена требуемая водоотдача подземного водопровода, пожар всегда удавалось локализовать и потушить.

Для бесперебойной подачи воды к месту тушения пожара на поверхности каждой шахты сооружаются пожарные водоемы и насосные станции, а в действующих горных выработках шахт должен быть проложен пожарно-оросительный трубопровод с автоматическим контролем давления воды, обеспечивающий тушение пожара в любой точке горных выработок шахты. Сеть пожарно-оросительного трубопровода состоит из магистральных и участковых линий. Диаметр трубопровода должен быть не менее 100 мм и постоянно заполнен водой.

Магистральные линии прокладываются в вертикальных и наклонных стволах, штольнях, околоствольных дворах, главных и групповых откаточных штреках и квершлагах, уклонах и бремсбергах. При наличии двух и более параллельных наклонных выработок пожарный трубопровод прокладывают по выработке, оборудованной ленточным конвейером, а пожарные краны в параллельные выработки можно выносить по сбойкам или скважинам. Участковые линии прокладываются в откаточных, вентиляционных и ярусных (промежуточных) штреках. Источником водоснабжения могут быть поверхностные водопроводы, реки, озера, пруды и др.

Давление воды в пожарных водопроводах у пожарных кранов должно составлять 0,6–1,5 МПа. Концы участковых пожарно-оросительных трубопроводов должны отстоять от забоев подготовительных выработок не более чем на 20 м и оборудоваться пожарными кранами, у которых располагается ящик с пожарными рукавами и стволами. Параметры магистрального трубопровода, проложенного по стволу и выработкам околоствольного двора к квершлагу до точки разветвления трубопровода в главные выработки, рассчитываются по суммарному расходу воды, необходимой для создания водяной завесы для преграждения

распространения подземного пожара, на непосредственное тушение пожара цельной струей из ствола. При этом общий расход воды на пожаротушение должен быть не менее  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Параметры участкового трубопровода рассчитываются только по расходу воды, необходимому на устройство водяных завес, при этом расход воды должен быть не менее  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В горных выработках обычно прокладывают объединенные пожарно-оросительные трубопроводы, подающие воду на пылеподавляющие устройства, а также для локализации и тушения пожаров. Все действующие в шахте водоотливные магистрали, воздухопроводы и пульпопроводы должны проектироваться с учетом их использования для борьбы с пожаром. Их рассматривают как резервные на случай аварии пожарно-оросительного трубопровода. Для удобства монтажа и демонтажа водопроводной линии трубы соединяют между собой посредством фланцев, которые привариваются перед спуском труб в шахту.

Пожарно-оросительный трубопровод оборудуется пожарными кранами, которые должны быть размещены в выработках с ленточными конвейерами через каждые 50 м. При этом дополнительно по обе стороны приводной головки конвейера на расстоянии 10 м от нее устанавливаются 2 пожарных крана. Пожарные краны должны быть установлены по обе стороны всех камер на расстоянии 10 м; у каждого ходка в склад взрывчатых материалов по обе стороны на расстоянии 10 м; с каждой стороны ствола у сопряжения с околоствольным двором; у пересечений и ответвлений подземных выработок.

В горизонтальных выработках, не имеющих пересечений и ответвлений, пожарные краны устанавливают через 200 м; в наклонных выработках, не имеющих пересечений, в околоствольных дворах, где нет камер, через 100 м. Рядом с пожарными кранами устанавливают ящик с рукавом длиной 20 м и пожарным стволом. Для отключения отдельных участков пожарно-оросительного трубопровода в случае ремонта магистрали, а также для того, чтобы подавать увеличенное количество воды к месту тушения пожара, на трубопроводе должны быть размещены задвижки. Задвижки устанавливаются на всех ответвлениях водопроводных линий.

Важной проблемой для шахт является снижение геодезического давления (за счет разности высот) в пожарно-оросительном трубопроводе до требуемого уровня 1,5 МПа, на которое рассчитано оборудование. В глубоких шахтах применяют ступенчатое редуцирование геодезических давлений гидроредукторами, представляющими собой дроссельное устройство с регулируемой величиной проходного сечения. Используются автономные гидроредукторы, работающие за счет энергии движущейся воды (ПШ-4м, КР-2, КР-3, РКГД).

**Противопожарные двери в шахтах.** Для быстрого отключения отдельных участков шахтной сети и их изоляции с целью предотвращения отравления людей продуктами горения и распространения огня на смежные участки выработок в шахте в наиболее ответственных узлах устанавливаются пожарные двери.

Пожарные двери должны быть негорючими или трудногорючими. Они устанавливаются во всех электромашинных камерах, складах ВМ, камерах селеновых выпрямителей, участковых трансформаторных камерах, насосных станциях, в выработках, соединяющих воздухоподающие стволы, в верхних и нижних частях наклонных штолен, капитальных уклонов, бремсбергов и ходков при них, на всех горизонтах вблизи стволов и шурфов, подающих свежий воздух.

В выработках с негорючей крепью полотнища пожарных дверей изготавливают из листовой стали толщиной 3–5 мм. Створки, которые может открыть 1 человек, снабжены запорным устройством и в открытом положении прикреплены к стенкам крючьями. Горное давление воспринимается не конструкцией двери, а пожарной аркой, расположенной на горизонтальном участке выработки. Арка сооружается из негорячего материала (бетон, кирпич, бетонит) с врубом по всему периметру выработки глубиной не менее 0,4 м для породы и не менее 1 м для угля. Вруб выполняется в устойчивых и нетрещиноватых горных породах, а если трещины имелись или возникли, их тампонируют цементным раствором.

В выработках с деревянной или комбинированной крепью (металлические арки, железобетонные стойки с деревянными затяжками) пожарные двери должны иметь теплоизоляцию из негорючего или трудногорючего материала (обычно асбестовая

ткань АТ-7, АТ-8, АТ-9). По обе стороны от арки на 2,5 м в почву укладывают бетон, и головка рельсов не должна выступать из бетона. Пожарные двери устанавливают на расстоянии не более 3 м от сопряжения ходка камеры с прилегающей выработкой. В открытом положении пожарные двери не должны мешать движению по выработке. В выработках, оборудованных ленточными конвейерами, устанавливают металлические пожарные двери с фигурными вырезами, чтобы створки могли закрываться без демонтажа конвейера.

#### **5.4. Первичные средства пожаротушения в шахте**

Первичными средствами пожаротушения в шахте являются: ручные, стационарные и передвижные огнетушители; вода, находящаяся под напором в системе пожарно-оросительного трубопровода; песок или инертная пыль и подручные средства.

В надшахтных зданиях и башенных копрах располагаются по семь ручных огнетушителей объемом по 10 л.

Первичные средства пожаротушения (ручные огнетушители объемом 10 л, песок или инертная пыль с лопатами) находятся внутри подземных камер у рабочего места дежурного персонала (от двух до семи огнетушителей). В камерах с непостоянным дежурством людей средства пожаротушения располагаются снаружи камер в специальной нише со стороны поступления свежей струи воздуха, не далее 10 м от входа в камеру. Если в камерах расположены центральные электроподстанции с масляным заполнением, то их противопожарную защиту осуществляют и автоматическими противопожарными установками (пенными, порошковыми).

Околоствольный двор снабжается семью огнетушителями. Семь огнетушителей также находится у сопряжения ствола с выработками горизонта.

Электровозные гаражи, лебедочные камеры и силовые стационарные маслоагрегаты в камерах должны иметь по семь огнетушителей и по 0,2 м<sup>3</sup> песка или инертной пыли.

Камеры подземных холодильных установок необходимо снабдить семью огнетушителями и 0,4 м<sup>3</sup> песка или инертной пыли.

Камеры передвижных компрессоров содержат по семь огнетушителей и по  $0,7 \text{ м}^3$  песка или инертной пыли.

По четыре огнетушителя и по  $0,2 \text{ м}^3$  песка или инертной пыли должны иметь центральные электроподстанции и зарядные камеры, камеры подземных ремонтных мастерских, участковые трансформаторные камеры, электрораспределительные пункты, камеры водоотлива.

Склады взрывчатых материалов должны содержать по четыре огнетушителя и по  $1 \text{ м}^3$  песка или инертной пыли.

По два огнетушителя и по  $0,2 \text{ м}^3$  песка или инертной пыли необходимо иметь у передвижных электроподстанций, в распределительных пунктах выработок, оборудованных ленточными конвейерами.

По два огнетушителя должны иметь:

- проходческие комбайны;
- породопогрузочные машины;
- дегазационные камеры;
- тупиковые горные выработки длиной более 500 м через каждые 50 м;
- выработки с горючей крепью через каждые 300 м;
- забои подготовительных выработок (не далее 20 м от места работы);
- погрузочные пункты лав (на расстоянии 3–5 м со стороны поступающей свежей струи воздуха);
- приводные и натяжные секции ленточных конвейеров;
- выработки с ленточными конвейерами через каждые 100 м;
- электромеханизмы, находящиеся вне камер;
- верхние и нижние площадки стволов, шурфов, уклонов бремсбергов и их сопряжений;
- подземные инструментальные камеры и здравпункты.

Зная температурный диапазон работы огнетушителей, в надшахтных зданиях и в выработках с отрицательной температурой применяют только порошковые огнетушители.

### **5.5. Основные направления предупреждения эндогенных пожаров**

Все меры, направленные на предотвращение эндогенных пожаров, исходят из условий снижения количества генерируемого тепла и увеличения его потерь из окисляющегося материала. Из них можно выделить три направления:

- применение систем разработки, обеспечивающих минимальные потери угля и высокие скорости подвигания очистных забоев;

- снижение концентрации кислорода в воздухе в выработанном пространстве за счет сокращения утечек воздуха, накопления метана и нагнетания инертных газов;

- использование антипирогенов, снижающих химическую активность угля и повышающих его теплопроводность и теплоемкость.

Первое направление – это общетехнические меры, второе и третье – это специальные меры профилактики.

Общетехнические мероприятия, направленные на уменьшение потерь угля и улучшение изоляции угля от притока кислорода, включают: полевую подготовку; отработку отдельными легкоизолируемыми полями; уменьшение размеров выемочных полей или их деление на блоки из расчета отработки в сроки, меньшие инкубационного периода; выемку угля с полной закладкой выработанного пространства; засыпку провалов на поверхности; изоляцию отработанных полей двойными перемычками с заполнением пространства между ними инертными материалами; применение в выработках, вскрывающих пожароопасные пласты, огнестойкой крепи; использование секционной системы проветривания с целью уменьшения действующих напоров.

Изоляция является одним из основных противопожарных мероприятий при разработке самовозгорающихся углей и руд. В основном изоляция осуществляется перемычками, возводимыми в горных выработках. Если на земной поверхности возникают провалы, то их также необходимо засыпать для улучшения изоляции. В изолированном пожарном участке снижается содержание кислорода и повышается концентрация углекислого газа, окиси углерода и метана.

Из специальных мер профилактики можно выделить:

1 – заиливание выработанного пространства глинистой пульпой; приводит к снижению воздухопроницаемости выработанного пространства за счет оседания глины, уменьшению химической активности угля за счет образования пленки на угле, охлаждению угля, увеличению его теплопроводности, повышению влажности воздуха, что тормозит процесс самовозгорания. Консистенция пульпы Т:Ж (соотношение твердой фазы к жидкости) должна быть 1:4–1:6;

2 – выравнивание давления воздуха; заключается в устранении перепада давления воздуха у изолирующей перемычки отработанного поля или между выработками действующего поля и поверхностью, являющегося причиной поступления воздуха к местам возможного скопления угля. Реализуется путем сооружения камеры выравнивания давления (рис. 5.2). Для создания камеры выравнивания давления на расстоянии 3–5 м от постоянной перемычки, изолирующей отработанное поле, возводится временная перемычка. В образующуюся камеру с помощью вентилятора местного проветривания начинают подавать воздух для создания в ней давления воздуха, равного давлению в заперемыченном пространстве. Эффективность камеры определяется замером давления воздуха в изолированном объеме и в камере через специально оставляемые трубки. Недостатком данного устройства является сохранение утечек воздуха через временную перемычку, что может спровоцировать самовозгорание угля;

3 – инертнизацию атмосферы за счет подачи инертных газов; приводит к снижению концентрации кислорода до безопасных значений и замедлению процесса окисления угля. Наиболее распространенным инертным газом, применяемым в шахтах для предупреждения самовозгорания, является азот. Для его получения могут использоваться разделительные установки в виде молекулярных сит или производится криогенное разделение воздуха. Жидкий азот удобнее транспортировать, однако подают его обычно в газообразном состоянии. Подачу азота в газообразном состоянии осуществляют в основном по скважинам с поверхности или близлежащих горных выработок из расчета сохранения необходимой концентрации кислорода (20 %) в действующих горных выработках;

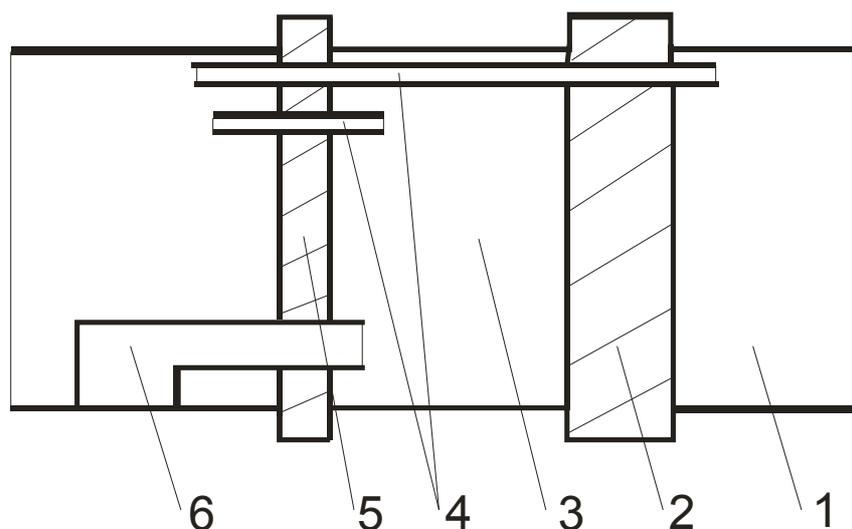


Рис. 5.2. Схема камеры выравнивания давления: 1 – изолируемый объем; 2 – постоянная перемычка; 3 – камера выравнивания давления; 4 – трубки для измерения давления воздуха; 5 – временная перемычка; 6 – вентилятор для подачи воздуха

4 – обработку угля антипирогенами; приводит к снижению его химической активности. В зависимости от механизма воздействия антипирогены делятся на три класса: пленкообразующие, препятствующие притоку кислорода к поверхности угля; снижающие скорость химического реагирования кислорода с углем (ингибиторы окисления); оказывающие комбинированное воздействие.

В качестве пленкообразователей используются хлоридно-глинистая паста, растворы жидкого стекла и высокомолекулярные органические соединения (латексы, смолы, полиакриламид, карбоксиметилцеллюлоза, фенолформальдегидная смола и др.). К антипирогенам-ингибиторам относятся марганцевокислый калий, хлористый кальций, фосфорнокислый аммоний, растворы бензосульфокислоты, триэтанолamina и др. Они либо дезактивируют уголь при взаимодействии с ним в адсорбционном слое, являясь сильными окислителями, либо выделяют при разложении газообразные продукты, которые взаимодействуют с углем.

Наиболее часто используемая в качестве антипирогена гашеная известь оказывает комбинированное действие на уголь. Использование антипирогенов традиционным нанесением на по-

верхность связано с трудностями, так как невозможно обработать весь уголь. В основном антипирогены используются для обработки целиков угля на контакте с действующими выработками.

Профилактической обработке ингибиторами и антипирогенами подвергают межблоковые, участковые барьерные целики и целики, оставляемые из-за аварий (в основном суспензией гашеной извести (добавка 5–10 % к воде), растворами хлористого кальция (10–20 %) и жидкого стекла (0,5–1 %) и их смесями).

Для снижения расхода и трудоемкости обработки выработанного пространства предложено подавать антипирогены в виде жидких и твердых аэрозолей по путям утечек воздуха в отработанную часть пласта. Разбрызгиватели жидкого антипирогена устанавливаются на угледобывающий комплекс и периодически включают по мере передвижения забоя. Способ позволяет производить объемную обработку скоплений угля в наиболее опасных зонах, к которым приурочена фильтрация воздуха. Однако необработанными оказываются скопления, формирующиеся при медленном разрушении целиков.

Профилактический эффект возникает при обработке угольных скоплений пеной, подаваемой в выработанное пространство по скважинам или по трубопроводу со стороны перемычек или действующего очистного забоя. Образующиеся пенные завесы препятствуют поступлению утечек воздуха к теряемому углю, а жидкая фаза после разрушения пены образует на поверхности угля пленку.

### **5.6. Пенный способ предупреждения эндогенных пожаров в шахтах**

Пожар, в том числе и эндогенный, возможен при наличии горючего материала, притока к нему необходимого количества кислорода, а также при соответствующих теплофизических отношениях между окисляющимся материалом и внешней средой, способствующих накоплению тепла. Профилактика эндогенных пожаров предусматривает комплекс мероприятий, направленных на снижение сорбционной активности угля, уменьшение притока кислорода к окисляющемуся материалу и активный отвод тепла от скопления угля.

Одним из самых эффективных комплексных средств профилактики самовозгорания является пена, подаваемая в выработанное пространство по скважинам или по трубопроводу со стороны перемычек или действующего очистного забоя. Образующиеся пенные завесы препятствуют поступлению воздуха к теряемому углю, а жидкая фаза после разрушения пены образует на его поверхности пленку, не допускающую проникновение кислорода к активным центрам угля. Небольшая плотность и значительная вязкость способствуют объемной обработке выработанного пространства. Практика применения пенного способа предупреждения эндогенных пожаров показала его высокую эффективность.

Пена представляет собой дисперсную систему, состоящую из пузырьков газа, разделенных тонкими пленками жидкости. Для образования устойчивых пен в жидкость вводят в небольших количествах (1–5 %) пенообразователи, в состав которых входят поверхностно-активные вещества (ПАВ). При оценке профилактических и пожаротушающих свойств пен используют следующие характеристики: кратность, стойкость, дисперсность, плотность, вязкость, теплоемкость, изолирующую способность.

**Кратность пены ( $K$ )** определяется отношением объема пены к объему пенообразующего раствора, необходимого для ее получения:

$$K = \frac{V_{\text{П}}}{V_{\text{Ж}}} = \frac{V_{\text{Г}} + V_{\text{Ж}}}{V_{\text{Ж}}}, \quad (5.1)$$

где  $V_{\text{П}}$ ,  $V_{\text{Ж}}$ ,  $V_{\text{Г}}$  – объем соответственно пены, пенообразующей жидкости и газа в пене, м<sup>3</sup>.

По кратности пены разделяют на три категории:  
 низкократные ( $K \leq 100$ );  
 средней кратности ( $100 < K \leq 300$ );  
 высокой кратности ( $K > 300$ ).

Пены кратностью 60–80 обладают максимальной стойкостью. В качестве газовой фазы пены при борьбе с эндогенными пожарами можно использовать атмосферный воздух, воздух изолированного пожарного участка с пониженным содержанием кислорода и инертный газ, например азот.

**Стойкость пены** характеризуется временем существования дисперсной системы. При борьбе с эндогенными пожарами в выработанном пространстве стойкость является одним из основных параметров пены, способствующих эффективной обработке самовозгорающегося угля. За меру стойкости принимается время распада всего объема или определенной его части, например половины.

**Дисперсность пены** определяется средним диаметром образующих пену пузырьков газа. Обычно он измеряется от сотых долей миллиметра до нескольких сантиметров. Уменьшение размера пузырьков повышает стойкость пены.

**Плотность пены** в основном зависит от ее кратности и определяется из выражения

$$\rho = \frac{\rho_{ж}}{K} + \left(1 - \frac{1}{K}\right)\rho_{г}, \quad (5.2)$$

где  $\rho_{ж}$ ,  $\rho_{г}$  – плотность соответственно пенообразующей жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность пены резко снижается при росте кратности до 12–15, затем медленно понижается до 11 кг/м<sup>3</sup> при кратности 100. Вязкость пены кратностью 60–100 более чем в 400 раз превышает вязкость воды.

Обработанные пеной разрыхленные массы угля и породы покрываются пленкой жидкости, препятствующей проникновению кислорода к активному веществу угля. В результате лабораторных исследований выявлено, что наибольшее антипирогенное действие пена оказывает на свежееобнаженный уголь, снижая его химическую активность в 5–7 раз. Так, если уголь марки К (пл. Мощный, шахта «Зиминка») имел химическую активность 0,159 мл/(г·ч), то после обработки пенообразующей жидкостью (5 % пенообразователя ПО-1Д) его активность снизилась почти в 7 раз (до 0,021 мл/(г·ч)).

Через 912 ч после начала эксперимента удельная сорбция обработанного пеной угля составила 7,74 мл/г, в то время как у необработанного – 25,22 мл/г (рис. 5.3). Эксперименты показали, что эффективность обработки водным раствором пенообразователя на 15–35 % выше по сравнению с другими составами на

жидкой основе, что можно объяснить лучшей смачиваемостью угля, из-за наличия в воде поверхностно-активного вещества.

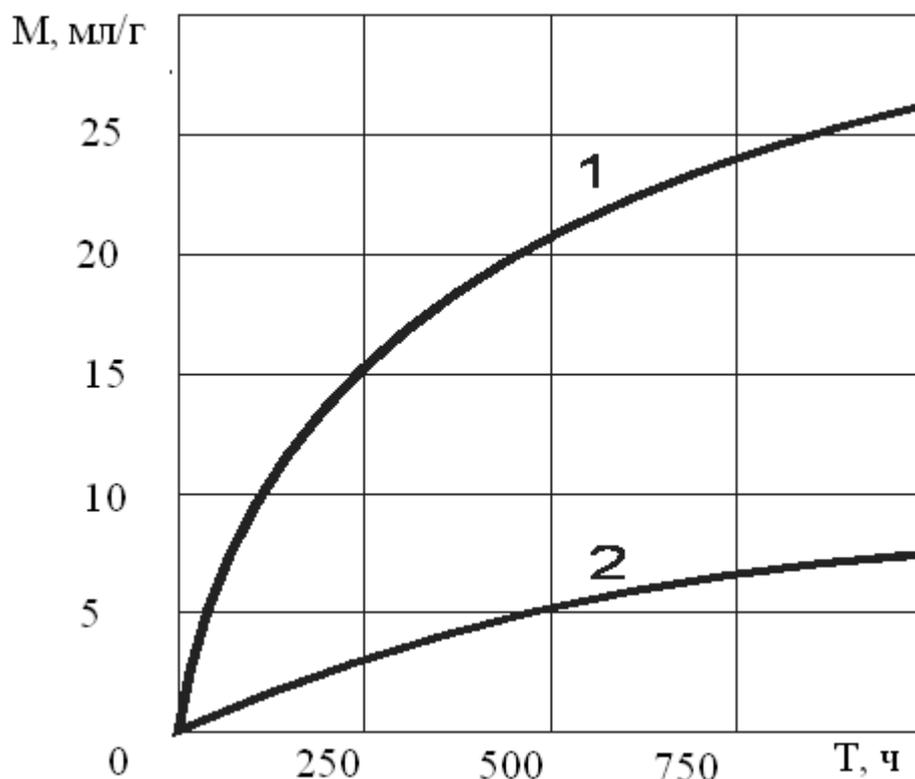


Рис. 5.3. Кинетика сорбции кислорода углем во времени: 1 – не обработан пеной; 2 – обработан пеной

С увеличением начальной степени окисления угля эффективность пенной обработки угля для снижения сорбционной активности по отношению к кислороду падает, поэтому профилактическую обработку пеной выработанного пространства целесообразно проводить вслед за подвиганием очистного забоя.

Пленка жидкости, образующаяся после подачи пены на поверхности угля и породы, снижает интенсивность самонагрева или прекращает его за счет дополнительных потерь тепла на нагрев и испарение жидкости, а также в результате роста коэффициента теплопроводности и теплоемкости скопления.

Выполненные расчеты показали, что в результате снижения химической активности угля и увеличения его влажности после пенной обработки длительность разогрева угля до критической температуры в процессе самовозгорания возрастает в 2–5 раз.

Причем этот эффект наблюдается при полном разрушении поданной пены и восстановлении утечек воздуха через выработанное пространство.

Изолирующее действие пены также приводит к замедлению процесса самонагрева за счет сокращения притока воздуха в выработанное пространство действующего выемочного поля. Эксперименты показали, что насыпка угля фракции 16–25 мм размером  $0,5 \times 0,5 \times 1,0$  м после пропитки пеной воздухопроницаема только при достижении перепада давления 6 860 Па. На основании измерений, выполненные в шахтах, установлено, что величина утечек сокращается в 2–3 раза после заполнения обрушенных пород объемом пены, составляющем 10–30 % от объема выработанного пространства. Восстанавливаются утечки воздуха через 3–8 сут после разовой подачи пены.

Используемые для получения пены пенообразователи и моющие средства относятся к поверхностно-активным веществам, незначительные добавки которых способны понижать поверхностное натяжение и улучшать смачивающую способность воды. Широкое применение получили следующие ПАВ: ПО-1Д, ПО-6Д, ПО-6К, ПО-12, «Прогресс-М20», «Прогресс-М30». Повышенными пенообразующими свойствами обладают пенообразователи «Сампо», «Поток», «Каскад», «Ива». В их состав введены стабилизаторы пены и другие добавки, повышающие эксплуатационные качества пенообразователей. Рабочие растворы ПАВ не оказывают раздражающего и кумулятивного действия на организм человека.

Смачивающая способность водных растворов в значительной степени обуславливает их профилактический, охлаждающий и пожаротушающий эффект. Добавка пенообразователя в количестве 1 % улучшает смачивающую способность в 30 раз, с 300 до 10 с и менее.

При генерации инертных и водовоздушных пен на сеточных пеногенераторах типа УЛЭП-2 или на бессеточных пеногенераторах типа ГПА-1 оптимальная концентрация пенообразователя «Прогресс-М30» равна 2,0 %, а ПО-1Д – 4,0 %.

Установки напорные УЛЭП-2 и «Экран» могут использоваться для получения пены и нагнетания ее под давлением в обрушенные уголь и породу для предупреждения эндогенных по-

жаров в отработанной части пластов. Обязательным условием их применения является наличие сжатого инертного газа или воздуха, а также воды. В качестве источника сжатого инертного газа применяются газификационные установки, а сжатый воздух подают компрессоры.

Для получения инертной пены непосредственно из жидкого азота и пенообразующей жидкости используется генератор азотной пены ГПА-1, имеющий производительность по пене  $12 \text{ м}^3/\text{мин}$  кратностью 30–80. Генератор не имеет сеток, а образование пены происходит при газификации жидкого азота, нагнетаемого в пенообразующий раствор.

Установки готовят к работе непосредственно в горных выработках или на поверхности у трубопроводов или скважин, пробуренных в выработанное пространство пласта. Подключается система трубопроводов к пожарно-оросительному трубопроводу и воздушной магистрали. Можно подключить установку к водяному насосу и воздушному компрессору или газификационной установке. Емкость с пенообразователем доставляют к месту работы, в нее опускают шланг подачи пенообразователя с фильтром. Скважины должны быть обсажены трубами с условным проходом не менее 80 мм и иметь фланцы для подсоединения пеногенератора.

При генерации пены одновременно происходит обратный процесс – ее распад. Скорость распада пены является величиной обратной ее стойкости. Работа любого пеногенераторного устройства с учетом распада пены описывается уравнением

$$dV_{\Pi} = Qd\tau - \frac{V_{\Pi}d\tau}{C_V}, \quad (5.3)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем генерируемой пены,  $\text{м}^3$ ;  $Q$  – производительность пеногенератора,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\tau$  – время работы пеногенератора, ч;  $C_V$  – стойкость пены, ч.

Решение уравнения (5.3) позволяет получить сохраняющийся объем пены  $V_{\Pi}$  при работе пеногенератора за время  $\tau$ :

$$V_{\Pi} = QC_V (1 - e^{-\tau/C_V}). \quad (5.4)$$

При  $\tau = \infty$  из уравнения (5.4) получаем выражение для расчета максимального объема пены, генерируемого пеногенератором:

$$V_{\max} = QC_V. \quad (5.5)$$

При нагнетании в равнопроницаемое выработанное пространство, благодаря большой вязкости и малой плотности, пена равномерно распространяется от точки подачи. Так как пена проходит только в порах скопления, в выработанном пространстве образуется максимальный объем сферической формы (рис. 5.4, а) следующего размера:

$$V_{\max} = QC_V = \frac{4}{3} \pi \Pi R^3, \quad (5.6)$$

где  $R$  – радиус объема выработанного пространства, заполненного пеной, м;  $\Pi$  – пористость выработанного пространства.

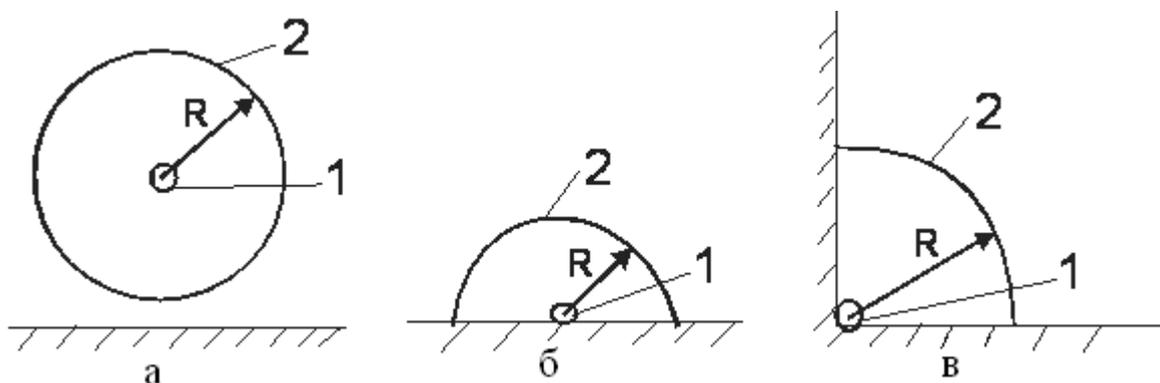


Рис. 5.4. Распространение пены при подаче в равнопроницаемое выработанное пространство (а), на почву отработанного пласта (б) и на границу целика и почвы пласта (в): 1 – точка подачи пены; 2 – граница заполненного пеной объема

В случае подачи пены на почву отработанного пласта объем пены образует в выработанном пространстве полусферу (рис. 5.4, б), а при подаче на границу целика и почвы пласта заполняется пеной четвертая часть сферы (рис. 5.4, в).

Объем пены, рассчитанный по выражению (5.6), образуется при бесконечно долгой работе пеногенератора. Для снижения длительности работы пеногенератора до приемлемых уровней необходимо уменьшить зону обработки. Исследования показали, что с этой целью необходимо ввести поправочный коэффициент ( $A$ ), равный 0,6–0,7. Исходя из изложенного, рекомендуемый радиус заполненного пеной выработанного пространства при ее подаче на границу целика угля и почвы пласта (рис. 5.4, в) можно определить по выражению

$$R_R = \left( \frac{3AQCV}{\pi\Pi} \right)^{1/3}. \quad (5.7)$$

Для обработки теряемых в выработанном пространстве пачек угля, а также бортов угольных целиков пену подают вдоль конвейерного, вентиляционного или одновременно обоих штреков в течение всего периода отработки столба. Подачу пены осуществляют по трубопроводам, укладываемым на почве пласта вдоль целика (рис. 5.5). Длина каждого оставляемого в выработанном пространстве (4) трубопровода (5) должна равняться  $2R_R$ . Диаметр трубопровода не менее 80 мм, на конце имеется перфорация (6) на длине 1–2 м из расчета 2–4 отверстия диаметром 30–40 мм по периметру трубы через каждые 30–40 см.

Обработку обрушенных пород проводят после посадки кровли и отхода комплекса (3) от перфорированного участка на расстояние  $R_R$ , что предотвращает выход пены в действующие выработки. После подачи необходимого количества пены пеногенератор отключается от трубопровода и на почву укладывается новый участок трубопровода, к которому подключают пеногенератор. Обработку выработанного пространства проводят до полной отработки столба.

Время работы пеногенератора для заполнения рекомендуемого объема выработанного пространства через одну точку подачи можно определить по формуле

$$\tau = C_V \ln \frac{QC_V}{QC_V - AQC_V}. \quad (5.8)$$

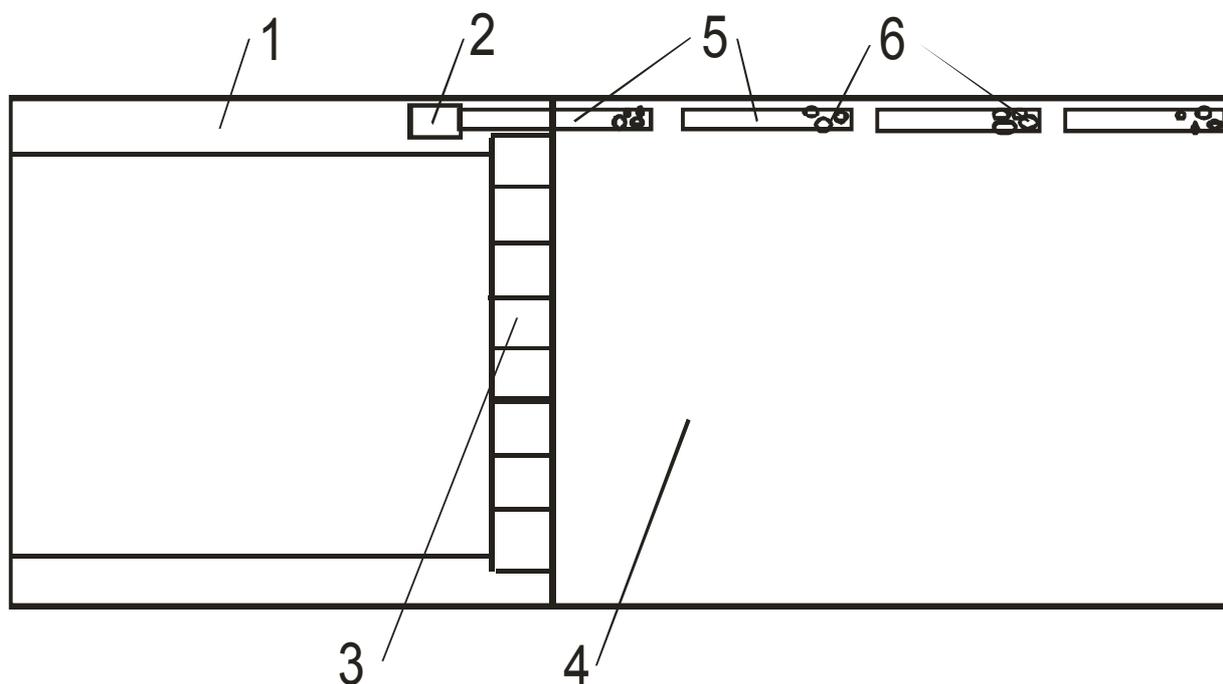


Рис. 5.5. Технологическая схема профилактики эндогенных пожаров на пластах пологого падения: 1 – вентиляционный штрек; 2 – пеногенератор; 3 – секции механизированного комплекса; 4 – выработанное пространство; 5 – оставляемые в выработанном пространстве трубопроводы; 6 – перфорированные участки

Необходимый для заполнения скопления угля и пород через одну точку объем пены рассчитывается по формуле

$$V_{\Pi} = Q\tau. \quad (5.9)$$

Требуемый для получения пены объем пенообразующей жидкости рассчитывают по выражению

$$V_{Ж} = V_{\Pi}K^{-1}. \quad (5.10)$$

Количество требуемого пенообразователя определяют по выражению

$$V_{ПО} = \frac{CV_{Ж}}{100}, \quad (5.11)$$

где  $C$  – концентрация пенообразователя в пенообразующей жидкости, %.

## 6. ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ

Тушение пожаров может осуществляться активным, пассивным или комбинированным способами. Элементом процесса тушения очагов горения может быть и локализация пожара, позволяющая предотвратить его распространение и снизить интенсивность горения.

Пожары, возникающие в зданиях, сооружениях, а также экзогенные пожары, возникающие в доступных местах подземных горных выработок и разрезах, обычно тушат активными способами. **Активный способ тушения** – это непосредственное воздействие на очаг горения огнегасительными веществами (водой, пеной, песком, огнегасительным порошком, инертным газом и пр.) или дистанционная подача в зону горения этих веществ по трубопроводам, скважинам или по подводящим выработкам, а также удаление горящих масс с их охлаждением.

**Пассивный способ тушения пожаров** предусматривает изоляцию пожарного участка и применяется в случаях, когда очаг недоступен, неизвестно его местонахождение, нет достаточных средств для тушения, они неэкономичны или существует угроза взрыва горючих газов (метана более 2 %). Способ изоляции – это прекращение доступа воздуха в пожарный участок путем возведения в выработках перемычек, тампонирования трещин, соединяющих пожарный участок с действующими горными выработками или поверхностью и др.

**Комбинированный способ тушения** – это сочетание непосредственного воздействия на очаг огнегасительными средствами с одновременной изоляцией пожарного участка перемычками для прекращения к нему доступа кислорода. Большая часть эндогенных пожаров ликвидируется пассивным или комбинированным способами.

Тушение пожара без предварительной изоляции за счет заполнения пожарного участка пеной, водой (затопление), инертными газами или закладкой относят к дистанционным способам тушения. При выборе способа ликвидации учитывается характер пожара, место его возникновения, размеры, стадия его развития и наличие необходимых средств пожаротушения.

**Локализация пожара** – это проведение мероприятий, которые ограничивают распространение горения и пожарных газов по сети горных выработок, а также способствуют затуханию очага пожара. Меры по локализации подземного пожара необходимо осуществлять на всех стадиях его тушения. В качестве первоочередных мер независимо от способа тушения применяются следующие способы локализации пожара:

- сокращение расхода воздуха, поступающего к очагам горения;
- установка водяных завес и создание преград на пути распространения пожара (установка временных перемычек, закрытие противопожарных дверей и др.);
- местное реверсирование вентиляционной струи;
- удаление горючего материала из зоны горения или на пути распространения пожара.

**Вентиляционные режимы при тушении подземных пожаров.** При тушении пожара в шахте должен устанавливаться вентиляционный режим, снижающий активность пожара и создающий условия для его тушения, а также предотвращающий скопление горючих газов до взрывоопасных концентраций и распространение продуктов горения в места нахождения людей. При тушении рекомендуются следующие вентиляционные режимы:

- прекращение проветривания горящих выработок пожарного участка;
- сохранение режима проветривания, существовавшего до пожара;
- увеличение или уменьшение расхода воздуха, поступающего к очагу, при сохранении существовавшего направления вентиляционной струи;
- реверсирование (опрокидывание) вентиляционной струи с сохранением, увеличением или уменьшением расхода воздуха;

– закорачивание вентиляционной струи в нормальном или реверсивном режиме проветривания.

Принятый вентиляционный режим должен быть устойчивым и управляемым. До полного вывода людей из аварийной зоны изменение вентиляционного режима, предусмотренного планом ликвидации аварии, запрещается.

При пожарах в надшахтных зданиях воздухоподающих стволов, в стволах со свежей струей, околоствольных дворах и примыкающих к ним главных воздухоподающих выработках наиболее эффективным является реверсирование вентиляционной струи в масштабе всей шахты после вывода людей из аварийной зоны. При пожарах в пределах выемочных полей (панелей) и в выработках с исходящими струями (вентиляционные выработки горизонта, крыла или шахты в целом, шурфы, вентиляционные сбойки, воздуховыдающие стволы и их надшахтные здания) сохраняется существующее направление вентиляционной струи с неизменяемым, уменьшенным или увеличенным расходом воздуха.

В ходе тушения пожара должен осуществляться непрерывный контроль за содержанием горючих газов (метан, оксид углерода, водород и пр.), кислорода, других параметров потока воздуха (температура и расход воздуха в выработках пожарного участка). Если содержание метана у места тушения достигнет 2 %, все люди, в том числе горноспасатели, должны быть выведены из опасной зоны, а для тушения использован способ, обеспечивающий безопасность работ.

### **6.1. Активное тушение экзогенных пожаров**

В зависимости от свойств горящего материала и условий пожара применяют следующие способы, отличающиеся механизмом пожаротушения:

– охлаждение очага и объекта горения до температуры, меньшей температуры вспышки горючего вещества (например, водой, песком, пеной и др.);

– предотвращение выхода горючих летучих веществ из горячей поверхности в окружающий воздух и поступление кисло-

рода к горючим компонентам (например, подача пены, плавящихся огнегасительных порошков и др.);

– снижение концентрации кислорода у горячей поверхности до безопасных значений (углекислым газом, азотом, паром);

– обрыв и предотвращение цепных реакций горения и (или) взрыва галоидированными углеводородами или огнегасительными порошками ингибирующего действия.

На практике в большинстве случаев используется сочетание различных механизмов пожаротушения.

Тушение пожаров в шахтах обычно начинают первичными средствами – пенными или порошковыми огнетушителями, песком, водой, а затем по возможности и необходимости вводят более мощные средства. Чтобы в случае развития пожара быстро локализовать его, одновременно с тушением начинают готовить участок к изоляции (подготовка врубов и материалов для сооружения изоляционных перемычек, в первую очередь на путях распространения пожара по выработкам с исходящей струей). Так, после изоляции очага, при снижении концентрации кислорода до 2–5 % горение прекращается.

Тушить пожар следует со всех подходов, в горной выработке их два – со стороны поступающей и исходящей струи. Однако часто невозможно подойти к очагу со стороны исходящей струи из-за высокой температуры. Чтобы не допустить распространения пожара, необходимо путем опрокидывания вентиляционной струи снизить температуру в этом районе, а затем активно тушить. Для предотвращения распространения огня по выработкам в направлении движения вентиляционной струи используют водяные завесы.

Простейшим средством тушения загораний и пожаров на начальной стадии развития является песок или инертная пыль. Мелкодисперсные частицы охлаждают горючее вещество, снижают доступ кислорода к его поверхности, механически сбивают пламя. Для ликвидации небольших очагов можно применять асбестовое, войлочное или иное полотно, изолирующее зону горения от проникновения свежего воздуха.

Наиболее распространенным средством борьбы с пожарами является вода. Однако ее нельзя применять для тушения оборудования и электрических проводов, находящихся под напряжени-

ем. Не следует применять воду для тушения бензина, керосина и других горючих жидкостей, плотность которых меньше плотности воды. Нельзя применять воду для тушения веществ, с которыми вода взаимодействует с выделением горючих и токсичных газов.

Ручные огнетушители применяются в шахтах для тушения пожаров в начальной стадии развития (тушения твердых веществ и легковоспламеняющихся жидкостей, горения метана). По виду огнетушащих средств огнетушители бывают жидкостными, пенными, порошковыми, углекислотными, аэрозольными и комбинированными. По объему корпуса огнетушители подразделяются на ручные малолитражные объемом до 5 л, промышленные ручные объемом 5–10 л, стационарные и передвижные объемом более 10 л.

Огнетушители жидкостные (ОЖ-5, ОЖ-10 и др.) применяют для тушения загораний твердых горючих материалов. В качестве огнетушащего вещества в них используют чистую воду, воду с добавками поверхностно-активных веществ. Выброс жидкости в этих огнетушителях осуществляется сжатым газом (воздух, углекислота, азот). Такие огнетушители не пригодны для борьбы с горящими нефтепродуктами, их жидкая фаза замерзает при низких температурах.

Пенные огнетушители используют химическую или воздушно-механическую пену. Огнетушители химические пенные (ОХП) содержат щелочную (водный раствор углекислой соды с добавкой вспенивателя) и кислотную (смесь серной кислоты с серноокислым окисным железом) части. При соединении этих компонентов выделяется углекислый газ, раствор вспенивается и выталкивается наружу. Огнетушители ОПШ-9 подают пену кратностью 6,5 на расстояние до 8 м, время их действия около 1 мин.

Порошковые ручные огнетушители (ОП) значительно эффективней пенных и получили наибольшее распространение. Попадая на горящую поверхность, порошок расплавляется, и образующаяся пленка препятствует газообмену у горящей поверхности. Предназначены для тушения древесины, конвейерных лент, масел и электрооборудования, находящегося под напряжением до 1140 В. Дальность подачи порошка огнетушителя ОП-8 до 6–8 м, масса порошка 8 кг, продолжительность действия 25 с. Одним

огнетушителем можно потушить 8 м<sup>2</sup> горячей деревянной крепи, или 50 кг угля, или 4 м<sup>2</sup> горячей конвейерной ленты, или горящего масла на площади 6 м<sup>2</sup>. Работает огнетушитель в диапазоне температур от –30 до +40 °С.

Для удобства доставки к пожару разработан ранцевый порошковый огнетушитель ОР-Ш, имеющий массу порошка 14 кг, дальность выброса около 7 м. С целью тушения пожаров в труднодоступных местах разработана забрасываемая порошковая граната ПООД-1. Используется для тушения древесины, минерального масла, метана, электрооборудования. Состоит из полиэтиленового корпуса с массой порошка 2 кг и рукоятки. При взрыве порохового заряда радиус разлета порошка составляет 2,5 м.

Углекислотные огнетушители содержат под давлением диоксид углерода (СО<sub>2</sub>) в жидком (до 75 %) и газообразном состоянии. При работе огнетушителя углекислый газ выходит из баллона, его давление и температура резко падает. С понижением температуры углекислый газ переходит в твердое состояние и на горящую поверхность поступает в виде снегообразной массы (температура исходящего газа около –80 °С).

Аэрозольные огнетушители хладоновые (ОАХ) прерывают процесс горения. В шахтах применяют огнетушители с ингибирующим составом (ОГС-7), предназначенные для тушения в горных выработках горящего метана, легковоспламеняющихся жидкостей, электрооборудования и других горящих материалов. Их не следует применять для тушения материалов, горение которых протекает без доступа воздуха. Состав БФ-2 содержит 73 % бромистого этила и 27 % тетрафтордибромэтана. С учетом токсичности употребляемых компонентов, в шахтах разрешают пользоваться хладоновыми огнетушителями только в изолирующей дыхательной аппаратуре.

Для подачи воды от пожарных кранов и насосов в очаг используют всасывающие и выкидные рукава, а также пожарные стволы. Всасывающие рукава предназначены для забора воды и состоят из нескольких слоев прорезиненной ткани со спиралью из проволоки. Диаметр всасывающих рукавов 60–125 мм.

Выкидные рукава предназначены для подачи воды от насоса до пожарного ствола или разбрызгивателя. Диаметр выкидных рукавов 66 и 77 мм, они выдерживают давление до 1,6 МПа.

Пожарные стволы позволяют подать воду при давлении 4–6 атм на расстояние до 20 м, а в горных выработках до 10–15 м.

Для создания водяных завес применяют водоразбрызгиватели. Так, разбрызгиватель ВВР-1 с двумя насадками обеспечивает расход воды 22–43 м<sup>3</sup>/ч при давлении 0,2–0,7 МПа. Диаметр получаемых капель воды около 100 мк, радиус их разлета до 7 м. Водоразбрызгиватель состоит из трубчатого тройника, соединительной головки и устройства для крепления к вагонетке или телескопической стойке. Расход воды на водяную завесу (для предотвращения распространения пожара) не менее 50 м<sup>3</sup>/ч. Целноструйное тушение из одного пожарного ствола требует расхода воды около 30 м<sup>3</sup>/ч.

Для подключения выкидных рукавов к водопроводу в местах, где нет пожарных кранов, применяют гидранты пистолеты (например, ГП-2, образующий отверстие диаметром 25 мм в трубах толщиной от 2 до 12 мм). Для пробивания отверстия в трубах используют пороховые заряды. Гидранты пистолеты применяются на свежей струе и в исходящих струях воздуха с содержанием метана не более 1 %. В их состав входят и заглушки для закрытия отверстия после прекращения отбора воды.

Установка для локализации подземных пожаров УЛП применяется для быстрой установки противопожарной завесы. Состоит из двух телескопических стоек для крепления в горной выработке и трубы-коллектора, в коленчатые штуцера которой ввинчены полидефлекторные насадки, равномерно распыляющие воду по сечению защищаемой выработки.

В случае распространения огня по горной выработке на расстоянии 20–30 м для тушения используют передвижные установки порошкового пожаротушения У-250, УП-500, устанавливаемые на тележки шахтной вагонетки. Масса зарядов установок соответственно 250 и 500 кг, время действия 60 с, дальность выброса струи 15 м, работают от баллонов сжатого воздуха. Для направления и регулирования подачи порошка используется пистолет, соединенный с установкой прорезиненным рукавом длиной 15 м. Установки позволяют ликвидировать пламя в выработке на протяжении 40–50 м.

Для автоматического пожаротушения водой на приводной головке ленточного конвейера применяют водоразбрызгиваю-

щую установку УАК-2, запускаемую тепловым замком при 47 °С с одновременным отключением электродвигателя конвейера. Автоматическая пожаротушащая порошковая установка «Буран» тушит пожары на головках ленточных конвейеров и отключает энергию. Масса тушащего заряда до 120 кг, температура срабатывания 47,5 °С и более. Продолжительность подачи порошка 10 с, защищаемая поверхность конвейерной ленты до 30 м<sup>2</sup>. Порошковая установка «Север» имеет те же характеристики, но устанавливается в электромашиных камерах, не имеющих постоянного обслуживающего персонала. Объем защищаемой камеры равен 200 м<sup>3</sup>.

## 6.2. Схемы активного тушения пожаров в выработках

### Тушение водой

Вода является наиболее эффективным средством тушения пожаров при горении твердых веществ. Она может подаваться в виде компактных струй или в распыленном виде (водяные завесы). Распыление намного улучшает огнегасительную способность воды, так как из-за большей поверхности она быстрее испаряется, поглощая тепло. Капли воды могут долго находиться в воздухе во взвешенном состоянии. Дисперсность образующихся капель пропорциональна давлению воды перед насадкой. При давлении 0,4–0,8 МПа дисперсность капель меняется от 0,5 до 0,1 мм. Необходимо помнить, что при попадании воды на раскаленные предметы происходит бурное парообразование, что может привести к ожогам, поэтому охлаждение очага начинают не с центра, а с периферии. Нельзя тушить водой горящее электрооборудование и кабели под напряжением.

**Пожары в горизонтальных выработках.** Работы по тушению пожара ведут обязательно со стороны движения на очаг свежего воздуха. Одновременно предупреждают распространение пламени в направлении движения продуктов горения установкой водяных завес. Устройство для распыления воды необходимо расположить как можно ближе к очагу. Если из-за высокой температуры установить завесу и удалить деревянную крепь невозможно, то производят реверсирование вентиляционной струи, но

при условии, что нет опасности поступления к очагу взрывчатых концентраций метана.

Локализация пожара при помощи водяной завесы производится следующим образом. На первом этапе пожар тушат из пожарных стволов со стороны поступления свежего воздуха, которые потом заменяют на разбрызгиватели (рис. 6.1, а, б). На втором этапе опрокидывают вентиляционную струю и устанавливают разбрызгиватели с другой стороны (рис. 6.1, в). На третьем этапе восстанавливают нормальное проветривание и тушат пожар струей, продвигаясь по выработке со стороны свежей струи (рис. 6.1, г).

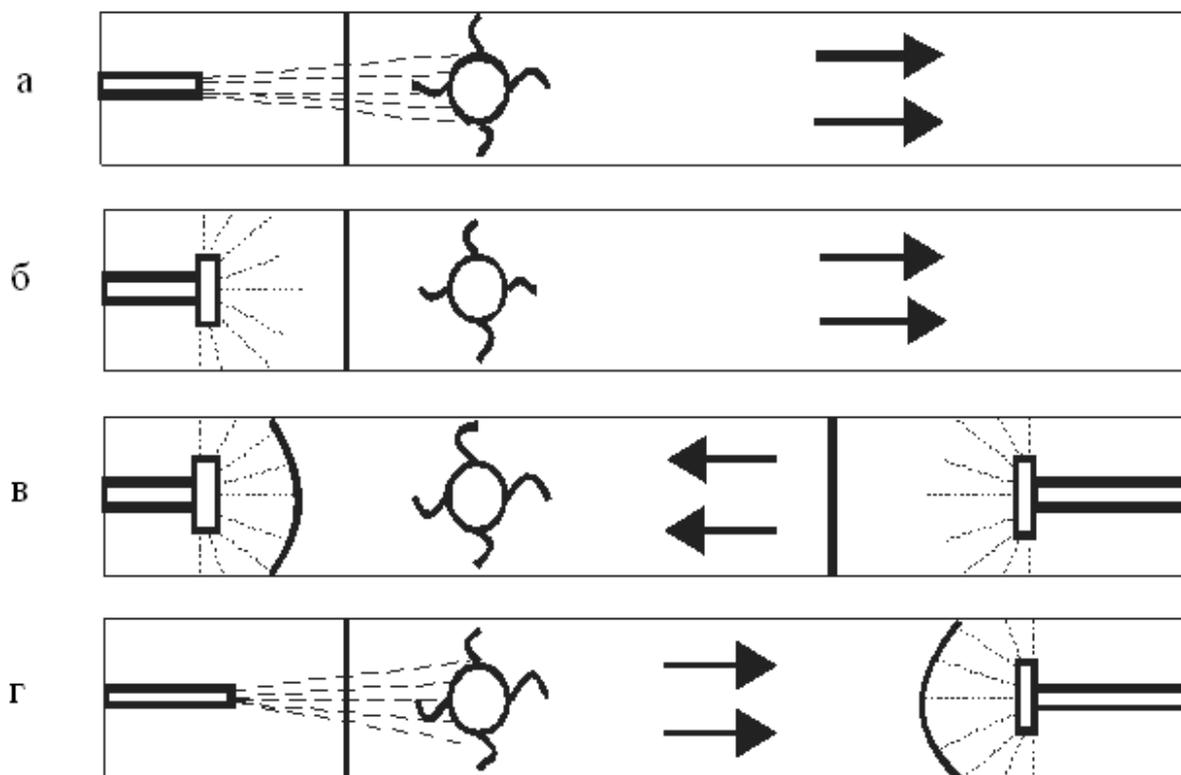


Рис. 6.1. Схема тушения пожара в горной выработке водой

Если завесы на исходящей струе ставят без реверсирования вентиляционной струи, то подачу воды прекращают, чтобы избежать ожога людей паром. Водоразбрызгиватели устанавливают по оси выработки на расстоянии  $2/3$  высоты от почвы и таком расстоянии друг от друга, чтобы их струи соприкасались. Разбрызгиватели ставят на всех возможных путях распространения

пожара, а если доступа нет, то проходят специальные обходные выработки.

**Пожары в вертикальных выработках.** Пожары в вертикальных выработках очень опасны, так как быстро распространяются снизу вверх в результате перемещения пламени под действием развиваемой тепловой депрессии. Огонь при таких пожарах часто выходит на поверхность и уничтожает надшахтные сооружения. Горящие материалы падают вниз, и это может вызвать возникновение новых очагов. Подход к таким пожарам очень опасен, так как при нисходящем проветривании при подходе сверху в любой момент может произойти опрокидывание вентиляционной струи под действием тепловой депрессии, а тушение снизу опасно из-за угрозы обрушения горячей крепи и пород.

Наиболее простой схемой тушения пожаров в вертикальных выработках является опускание водоразбрызгивателей в район очага на канате при помощи ручной лебедки. Для уменьшения поступления к очагу воздуха устье вертикальной выработки после вывода людей из шахты следует перекрыть лядами или полками, в которых оставляют отверстия для прохода пожарных рукавов и каната. На 1 м<sup>2</sup> площади охраняемой вертикальной выработки в водоразбрызгиватель подают не менее 4 м<sup>3</sup>/ч воды.

При опускании пожарных рукавов следует рассчитать ожидаемый пьезометрический напор воды перед разбрызгивателем. Для тушения пожара в вертикальном стволе следует использовать все имеющиеся к нему подходы: выработки промежуточных горизонтов, трубнокабельные ходки, вентиляционные и калориферные каналы. В случае неэффективности или невозможности применения воды, выработки заполняют пеной с поверхности.

**Пожары в электромашинных камерах.** Пожары, возникшие в электромашинных камерах, тушат подачей воды со стороны поступающей вентиляционной струи при закрытых противопожарных дверях (рис. 6.2). Если температура очага высокая и трудно приблизиться к камере, то тушение подачей воды начинают при открытых дверях, что увеличивает вынос тепла из камеры. Однако в этом случае для локализации пожара и охлаждения продуктов горения во втором ходке устанавливается водяная завеса (рис. 6.3).

При очень высокой температуре в камере, не позволяющей приблизиться к очагу пожара, для тушения применяется пена, которой заполняют весь объем камеры.

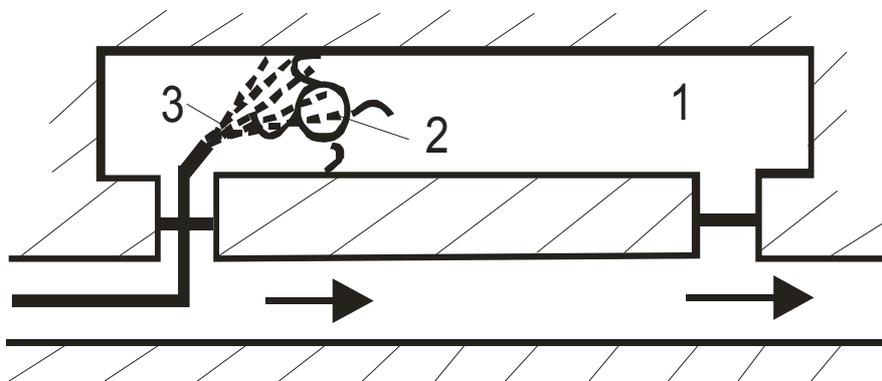


Рис. 6.2. Тушение пожара водой в камере при закрытых противопожарных дверях: 1 – камера; 2 – очаг; 3 – подаваемая струя воды

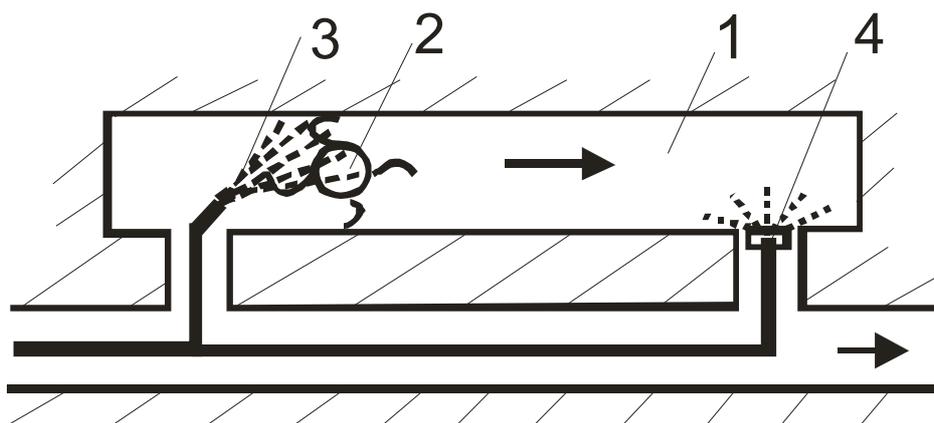


Рис. 6.3. Тушение пожара в камере водой с постановкой водяной завесы: 1 – камера; 2 – очаг; 3 – подаваемая струя воды; 4 – водяная завеса

**Пожары в наклонных выработках.** В уклонах и наклонных стволах с нисходящим движением вентиляционной струи воздуха перед тушением пожара вначале выводят людей из шахты. Затем должно быть проведено реверсирование струи, и тушение пожара должно осуществляться снизу.

Водоразбрызгиватели для создания водяной завесы опускаются к очагу или устанавливаются в устье наклонной выработки. Для защиты от обрушения горящим материалом работы по туше-

нию ведут под специальными полками. Тушение сверху допускается в исключительных случаях, когда очаг в непосредственной близости от выше расположенной горизонтальной выработки и имеется устойчивая нисходящая струя. Как при всех пожарах, должны приниматься меры по сокращению поступления воздуха к очагу: установка временных перемычек в верхних и нижних частях выработок, закрытие противопожарных дверей. Если не удастся потушить водой, выработку заполняют пеной.

### **Выемка пожарных очагов**

Выемка горячей массы применяется в случаях, когда очаг находится в недоступном месте (в завале после выгорания крепи, в выработанном пространстве вблизи от действующих горных выработок), и обычно комбинируется с тушением водой.

Вначале пожар оконтуривают разведочными выработками, проведенными по выработанному пространству или целикам угля, пород. Затем из разведочных выработок проводят пожарные выработки для подступа к очагу пожара. Подойдя к горящему углю, его заливают водой, затем вынимают, грузят в вагонетки и выдают на поверхность. Иногда, для лучшего охлаждения разогретой горной массы, пользуются пожарными пиками, внедренными в обрушенные породы. Вода выходит из просверленных на конце пики отверстий.

После тушения все выработки, пройденные по обрушенным породам и целикам угля, а также восстановленные для подхода к очагу старые выработки должны быть изолированы, затампонированы глиной или заилены, так как при некачественной изоляции возможны рецидивы пожара.

### **6.3. Инертизация рудничной атмосферы при тушении пожаров в горных выработках**

Нередко тушение пожаров в шахтах осложняется из-за выделения горючих газов, способных взрываться при определенной концентрации и температуре. Наиболее часто таким горючим газом в шахтах является метан. Кроме того, при пожаре могут дополнительно образовываться такие горючие газы, как оксид углерода, водород. Для предотвращения взрывов горючих газов при

пожаре осуществляют инертнизацию (снижение концентрации кислорода) атмосферы в пожарном участке подачей инертных газов. Снижение концентрации кислорода способствует также более быстрому тушению пожаров. В качестве инертных газов наиболее часто применяют азот, а также углекислый газ, получаемый в генераторах инертных газов при сгорании топлива (ГИГ-4, ГИГ-150, ГИГ-300 и др.).

Генератор парогазовый ГИГ-4 (рис. 6.4) представляет собой авиационный турбореактивный двигатель, дополненный камерой дожигания, камерой охлаждения и агрегатами, обеспечивающими работу генератора (фильтр очистки воды, топливный насос, емкости для топлива и др.). Турбореактивный двигатель АИ-8П нагнетает образующуюся при сгорании топлива газоздушную смесь с температурой 400 °С в камеру дожигания, куда впрыскивается топливо в парообразном виде. При горении содержание кислорода в газовой смеси снижается до 1,7 %. В следующей камере (охлаждения) в газовую смесь впрыскивается вода. В результате испарения воды образующаяся смесь охлаждается до 80–90 °С.

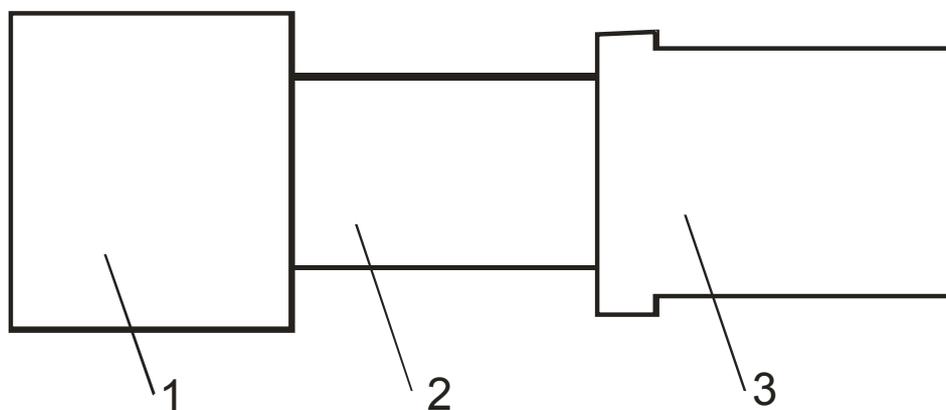


Рис. 6.4. Парогазовый генератор ГИГ-4: 1 – турбореактивный двигатель; 2 – камера дожигания; 3 – камера охлаждения

Генератор имеет пульт дистанционного управления и систему блокировок, отключающих установку при отклонении от заданных параметров. Для удобства транспортировки парогазовый генератор выполнен из отдельных секций. Производительность генератора по газу 343 м<sup>3</sup>/мин, расход топлива не более

850 кг/ч. Образующаяся газовая смесь содержит 51,8 % азота, 40 % водяного пара, 7 % углекислого газа, 0,2 % оксида углерода и около 1,0 % кислорода. Масса установки 800 кг, длина 6,5 м, расход воды 27 м<sup>3</sup>/ч, время непрерывной работы 6 часов.

Генератор инертных газов ГИГ-150 имеет производительность по парогазовой смеси до 150 м<sup>3</sup>/мин, ГИГ-300 до 5 370 м<sup>3</sup>/мин, ВГИГ-300 до 400 м<sup>3</sup>/мин, МГИГ-250 до 300 м<sup>3</sup>/мин.

Высокая производительность установок по парогазовой смеси позволяет быстро инерттизировать атмосферу горных выработок, благодаря чему предотвращается опасность взрыва горючих газов, угольной пыли и прекращается пламенное горение.

Недостатком парогазовых генераторов является высокая температура выдаваемых газов и высокое содержание пара, что приводит к разогреву горных пород, увеличению их пластичности. Повышение температуры угля может служить толчком развитию процесса самовозгорания, а увлажнение пород способствует их обрушению. Кроме того, в смеси газов большая концентрация оксида углерода, что затрудняет контроль за пожаром.

Нередко в качестве инертного газа для подачи в горные выработки используют газообразный азот, обычно хранящийся и транспортируемый в сжиженном виде. Испарение азота осуществляется в холодных газификаторах (используется тепло окружающего воздуха) или в теплообменниках с электронагревателями. Так, холодные газификаторы ГХК 8/1,6-1000 обеспечивают получение азота под давлением до 1,6 МПа с производительностью до 2 200 м<sup>3</sup>/ч. Передвижная газификационная азотная станция ПеГАС 100/200 также предназначена для газификации жидкого азота и подачи его в горные выработки. Оборудование размещено на платформе автомобиля КраЗ, производительность станции до 100 м<sup>3</sup>/мин газообразного азота.

В последние годы перспективными становятся мембранные технологии получения газообразного азота. Применение установок пятого поколения, использующих пористое полимерное волокно с нанесенным газоразделительным слоем, позволяет получить газообразный азот чистотой 95–99,95 % под давлением от 0,5 до 4 МПа с производительностью до 5 000 м<sup>3</sup>/ч. Для борьбы с пожарами на шахтах можно использовать передвижные азотные мембранные станции серии АМВЦ. Производительность

по газу у этих установок от 150 нм<sup>3</sup>/ч (АМВП-2,5/0,7) до 1 590 нм<sup>3</sup>/ч (АМВП-26,5/7) под давлением 0,8 МПа с чистотой азота 99,5 %.

#### **6.4. Изоляция пожарных участков**

Изоляцию пожарных участков применяют в случаях, когда другими способами пожар потушить невозможно. Изоляция участка – это исключение его из общей схемы проветривания с целью прекратить доступ воздуха в очаг пожара и не допустить проникновения токсичных пожарных газов в действующие выработки. Изоляция достигается путем сооружения в горных выработках временных или постоянных перемычек. Рекомендуется изолировать минимальный объем горных выработок, что приведет к быстрому снижению концентрации кислорода. Однако в газовых шахтах при выборе мест возведения перемычек необходимо учитывать опасность взрыва, поэтому их сооружают на безопасном расстоянии от очага пожара. Иногда приходится возводить множество перемычек, постепенно приближаясь к очагу. Изоляция участка считается удовлетворительной, если в районе горения в изолированном пространстве будет достигнута концентрация кислорода, при которой прекращается горение (для угля – 2 % кислорода по объему).

Все перемычки для изоляции пожарного участка должны сооружаться, как правило, одновременно. В негасовых шахтах при сильной задымленности и высокой температуре исходящих газов перемычки могут вначале возводить в выработках, по которым воздух поступает к очагу. После их закрытия сооружают перемычки в выработках с исходящей струей. Если есть угроза распространения пожара по выработке с исходящей струей или в другие выработки, то перемычки в первую очередь сооружают в выработке с исходящей струей воздуха. При этом вентиляционная струя реверсируется, а в выработке с поступающей струей осуществляют меры по предотвращению распространения пожара (установка водяных завес, извлечение горючих элементов крепи, оборудования и др.). Затем восстанавливают первоначальное проветривание и перемычки возводят в выработках с поступающей вентиляционной струей.

При выборе места возведения перемычки необходимо учитывать:

- схему расположения горных выработок в районе пожара;
- место пожара, размеры и скорость его распространения;
- степень нарушенности боковых пород и угольных целиков;
- температуру воздуха на подступах к пожару;
- возможность осуществления вентиляционных маневров в период изоляционных работ;
- значимость выработок, теряемых при изоляции, для дальнейшей эксплуатации шахты.

В главных выработках, по которым воздух поступает в пожарный участок и выходит из него, обычно возводят огнестойкие перемычки (кирпичные, бетонные). В боковых выработках, примыкающих к пожарному участку, можно возводить неогнестойкие перемычки (чураковые, брусчатые), если на них не может распространиться пожар. Перемычки, сооружаемые в главных выработках, должны иметь проемы расчетного сечения, обеспечивающего нормальное проветривание пожарного участка во все время изоляционных работ. Проемы должны герметично закрываться дверями или лядами. В боковых выработках перемычки сооружаются глухими.

При изоляции пожарных участков можно сооружать временные и постоянные перемычки. К временным перемычкам относят парусные и дощатые; они газопроницаемы, не обеспечивают полного прекращения доступа воздуха к очагу. Их применяют, когда необходимо быстро сократить количество воздуха, поступающего к пожару (парусные), или задержать его распространение по горным выработкам (дощатые), пока у мест изоляции не будут сосредоточены необходимые материалы для сооружения постоянных перемычек. Временные перемычки применяют и для улучшения условий сооружения постоянных перемычек (прекращают распространение дыма и токсичных газов). Парусные перемычки представляют собой полотна из брезента или парусины, которыми перекрывается сечение выработки. Полотно крепят к стойкам и верхнему крепежной рамы.

Постоянные перемычки бывают бетонитовые, кирпичные, бетонные, шлакоблочные, шлаконаливные, чураковые, брусча-

тые. Для лучшей герметизации их возводят во врубах, глубиной не менее 0,5 м по породе и 1 м по углю. Применяют и безврубные перемычки. Перемычка должна отстоять от места пересечения выработки не менее чем на 5 м, чтобы в случае необходимости можно было рядом с ней соорудить дополнительную перемычку и чтобы не войти в зону трещиноватых пород.

В каждую постоянную перемычку должна закладываться труба диаметром 40–50 мм для отбора проб воздуха на расстоянии от почвы, равном  $\frac{2}{3}$  высоты выработки. Труба должна выступать не менее 2 м за перемычку и на 20–30 см в сторону действующих выработок и иметь на внешнем кольце резьбу для навинчивания заглушки. В выработках откаточного горизонта через перемычку на расстоянии 0,2–0,3 м от почвы должна проходить труба диаметром 75–100 мм У-образной формы для стока воды из пожарного участка. В горизонтальных выработках для усиления изоляции на расстоянии 3–5 м возводят дополнительные перемычки, а образующееся между ними пространство заиливают. Для замера температуры и отбора проб газа через обе перемычки пропускают трубу диаметром 40–50 мм, а для стока воды трубу диаметром 100–150 мм.

Для локализации взрывов при изоляции пожаров возводят взрывоустойчивые перемычки, баррикадные, барьерные, шпренгельные и быстровозводимые гипсовые. Взрывоустойчивая перемычка – это искусственно возводимая из гипса, бетона, кирпича, бруса и других строительных материалов шахтная перемычка для перекрытия поперечного сечения горной выработки в целях предотвращения разрушающего действия воздушной ударной волны взрыва. От других перемычек отличается повышенным сопротивлением к ударным воздействиям и динамическим нагрузкам.

Баррикадные перемычки сооружают из мешков с песком, глиной, слоями, каждый слой засыпают инертным материалом для заполнения пустот между мешками. Длина перемычки должна быть не менее 6 м. Барьерные перемычки возводят путем обрушения кровли горных выработок буровзрывным способом. Барьерные и баррикадные перемычки возводят на расстоянии 15–20 м от изоляционных перемычек со стороны очага пожара. Шпренгельные перемычки состоят из двух деревянных (из брус-

ев), одна из которых со щелями для гашения энергии ударной волны, вторая герметичная.

Надежной и легковозводимой взрывоустойчивой перемышкой является гипсовая, возводимая с помощью комплекса оборудования «Темп». В качестве материала применяется пластифицированный гипс, получаемый из строительного гипса и пластифицирующей добавки ССБ (сульфитно-спиртовой барды). Он легко смачивается, образуя растворную смесь, быстро твердеющую до камневидного состояния. Исследования показали, что гипсовые перемышки взрывоустойчивы. «Темп» состоит из смесительно-нагнетательной установки, рукавной линии, пульта управления, проемной трубы с дистанционно управляемым клапаном.

Работает комплекс «Темп» следующим образом: к месту возведения перемышки доставляют в вагонетках пластифицированный гипс (в мешках), подводят воду, ставят опалубки и в смеситель подают воду и гипс, а образующийся раствор поступает по рукавам в пространство между опалубками. Раствор растекается, проникая в закрепное пространство, и тампонирует щели и пустоты. В тело перемышки (между опалубками) ставят проемную трубу для управления вентиляционным режимом изолируемого участка во время возведения перемышки. Об окончании заливки свидетельствует датчик уровня, и через 1,5 ч раствор твердеет. Производительность установки по гипсу 7–9 м<sup>3</sup>/ч, дальность подачи раствора 200 м, давление нагнетания до 1,0 МПа.

Изолированный пожар считается потушенным, если:

- содержание кислорода в пожарном участке не превышает 3 % и отсутствует повышенная по сравнению с фоном концентрация оксида углерода или в течение 7–10 сут обнаруживаются только следы оксида углерода;
- замеренная за перемышками температура воздуха и вытекающей из пожарного участка воды не превышает нормальной;
- отсутствуют признаки дыма в выработках, примыкающих к пожарному участку.

Однако, несмотря на эти условия, вскрываемые пожары иногда продолжают действовать. Причиной низкой эффективности тушения пожаров методом изоляции является очень медленное остывание разогретого угля, сохраняющиеся прососы воздуха

через перемычки, поэтому необходима выдержка изоляции расчетное количество времени.

### **6.5. Комбинированное тушение пожаров**

Ненадежность способа тушения пожаров изоляцией (возможны значительные прососы воздуха), а также возникающие сложности применения прямого тушения (отсутствуют средства огнетушения, невозможность приблизиться к очагу) способствуют применению комбинированного способа тушения. Способ предусматривает на первом этапе изоляцию пожара возведением перемычек, что снижает его активность, а на втором этапе активное тушение подачей в очаг различных хладагентов.

Наибольшим охлаждающим эффектом при тушении пожаров обладают вода или смеси воды с глиной, золой и другими мелкодисперсными материалами (пульпы). При подаче пены происходит меньший теплосъем на единицу подаваемого объема хладагента, однако преимуществом пены является ее объемное распространение и изолирующий эффект, позволяющий снизить приток воздуха к очагу и уменьшить генерацию тепла. Тушение может осуществляться через вскрываемые перемычки, через оставленные в перемычках трубы или через скважины, пробуренные с поверхности или из близлежащих горных выработок.

### **6.6. Тушение подземных пожаров пеной**

Наиболее эффективна пена при тушении пожаров в камерах, вертикальных и наклонных выработках, в которых можно обеспечить быстрое заполнение пеной всего объема выработок. Поэтому важно создание высокопроизводительных установок мощностью 1 000 м<sup>3</sup>/мин и более. Практика показала, что в 90 % случаев тушение пожаров в шахтах пеной было успешным.

В настоящее время для тушения пожаров применяются пеногенераторы, позволяющие получать до 1 000 м<sup>3</sup>/мин пены. Пеногенераторные установки ПГУ-1, ПГУ-2, ПГУ-100, ПГУ-200 получают воздух для генерации пены от вентилятора местного проветривания (рис. 6.5) и содержат сетки, на которые разбрызгивается подаваемый под давлением пенообразующий раствор.

Все установки ПГУ выдают пену только высокой кратности (400–600), что снижает эффект пожаротушения и ограничивает область их применения. Одним из недостатков пеногенераторов типа ПГУ является необходимость электроэнергии, что не всегда выполнимо в условиях аварийной ситуации.

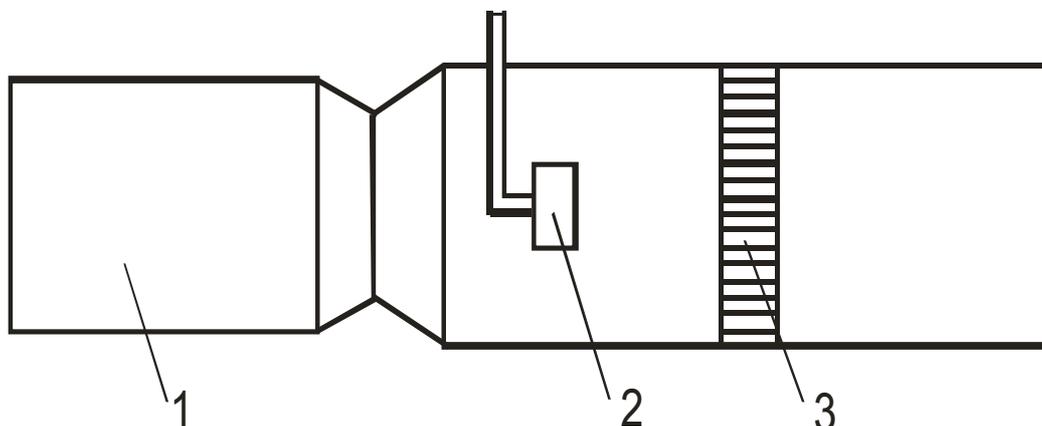


Рис. 6.5. Пеногенераторная установка ПГУ-200: 1 – вентилятор местного проветривания; 2 – разбрызгиватель пенообразующего раствора; 3 – сетка

Пеногенератор ПЭК не требует электроэнергии и сжатого газа. Получение пены кратностью 100–500 происходит за счет энергии, создаваемой давлением пенообразующей жидкости. Пеногенератор ПЭК-1 имеет трубное кольцо, на котором расположены распылители, подающие пенообразующий раствор на пакет сеток (рис. 6.6). Капли жидкости увлекают с собой поток окружающего воздуха, и при прохождении этих компонентов через сетки образуется пена. Производительность пеногенератора ПЭК по пене 120–500 м<sup>3</sup>/мин, дальность полета струи пены до 25 м. Давление пенообразующей жидкости в трубопроводе должно быть не менее 0,4–1,2 МПа. Преимуществом ПЭК является возможность получать пену в изолированном пожарном участке без добавления свежего воздуха.

Пеногенераторная перемычка ППП-8 предназначена для получения пены высокой кратности за счет общешахтной депрессии. Устройство представляет собой брезентовую ткань, в центре которой расположен круг диаметром 2 м, состоящий из сетки с размером ячейки 1×1 мм, внизу закрытый лаз. Перемычка ППП-8

укрепляется в выработке (рис. 6.7) с помощью рам, и через распылитель пенообразующая смесь разбрызгивается на сетку. Проходящий по выработке воздух образует на сетке пену. Скорость вентиляционной струи в месте установки переемычки должна быть не менее 1,5 м/с. Производительность переемычки по пене до 300–400 м<sup>3</sup>/мин.

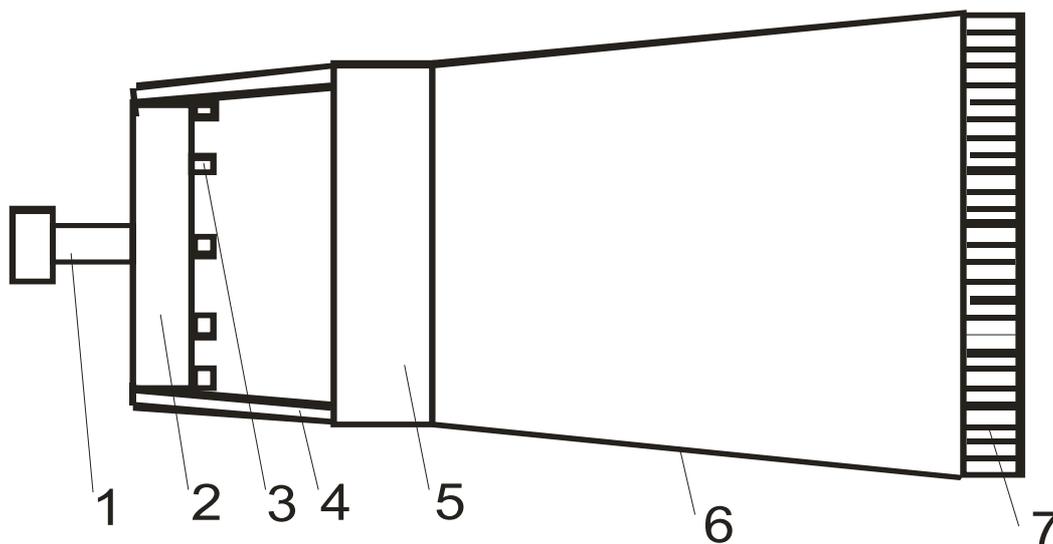


Рис. 6.6. Пеногенератор ПЭК: 1 – труба с пожарной гайкой; 2 – трубное кольцо; 3 – распылители; 4 – центрирующие тяги; 5 – камера смешения; 6 – диффузор; 7 – пакет сеток

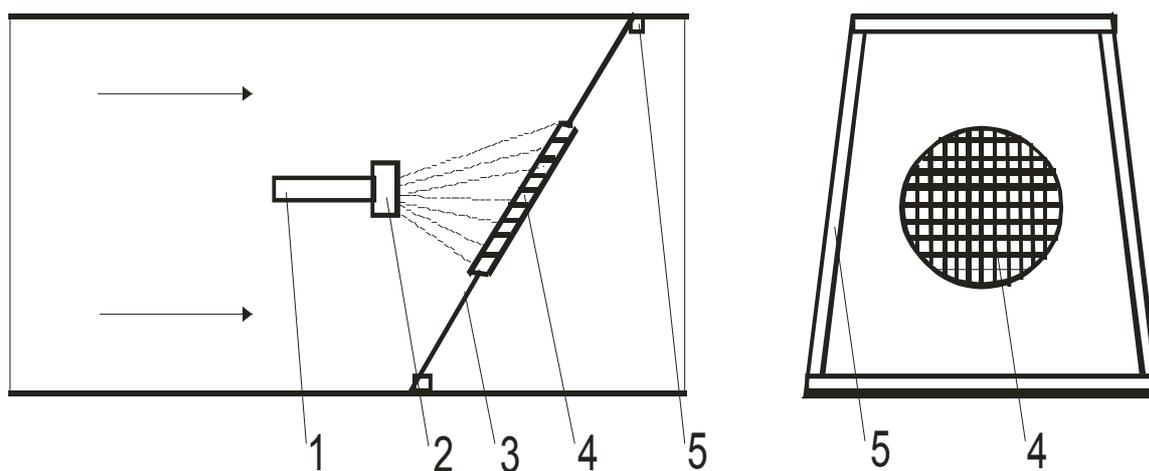


Рис. 6.7. Пеногенераторная переемычка ППП-8: 1 – труба для подвода пенообразующей жидкости; 2 – распылитель; 3 – брезентовая ткань переемычки; 4 – сетка; 5 – каркас для крепления переемычки

Стационарный воздушно-пенный огнетушитель ОС-200М предназначен для тушения твердых и жидких горящих материалов, кроме электрооборудования под напряжением, и может располагаться в специальной нише или на свободной площадке. Огнетушитель состоит из цистерны, содержащей пенообразующую жидкость в объеме 200 л. Жидкость из цистерны вытесняется сжатым углекислым газом, образующимся при взаимодействии кислоты и щелочи, и по пожарному рукаву (в комплекте длиной 20 м) поступает в воздушно-пенный ствол, где генерируется пена. Кратность получаемой пены 9, продолжительность подачи пены 5 мин, дальность струи не менее 8 м. Передвижной пенный огнетушитель ОП-500М может перемещаться по рельсовому пути. Вместимость пенообразующей жидкости составляет 500 л, количество получаемой пены 5 000 м<sup>3</sup>, время действия 12 мин, дальность подачи пены 8–10 м, принцип действия такой же.

Пеногенераторная установка «Вьюга» смонтирована на автомобиле и предназначена для тушения пожаров в вертикальных и наклонных стволах, шурфах, сбойках и окоlostвольных дворах. Производительность установки по пене от 500 до 1 000 м<sup>3</sup>/мин, кратность пены 300–500.

Автоматическая пенная пожарная установка УАП предназначена для тушения пожаров в подземных камерах. Установка срабатывает при повышении температуры (легкоплавкий замок), выдавая пену и закрывая противопожарные двери. Температура срабатывания от 72 °С, количество получаемой пены 19 м<sup>3</sup>, кратность пены до 8, время работы 4 мин.

Для повышения эффективности тушения пожаров при получении пены используют инертные газы, обычно азот. Генератор инертной пены ГИП работает за счет энергии, создаваемой давлением азота и воды, подаваемых на сетку. Получаемая пена имеет кратность до 500, производительность генератора по пене до 120 м<sup>3</sup>/мин. Наиболее целесообразно использовать инертную пену для тушения пожаров в тупиковых выработках, где атмосфера быстро инертизируется из-за выделения азота из распавшейся пены, предотвращая взрывы горючих газов.

Для тушения пожаров в выработках больших объемов (вертикальные, наклонные) следует применять пены высокой кратности, а в камерах, куполах, тупиковых забоях – пену средней крат-

ности. В газообильных выработках при подаче пены необходимо следить за содержанием горючих газов в атмосфере, так как пена, заполняя выработки, сокращает поступление воздуха. Если содержание метана достигает 2 %, пуск пены должен быть прекращен и начаты работы по тушению другими средствами. После заполнения горящих выработок пеной необходимо поддерживать ее объем до окончания тушения путем периодического включения в работу пеногенератора.

Пеной удобно тушить пожары в куполах, за бетонной крепью, так как благодаря вязкости и небольшой плотности пена заполняет весь свободный объем, не стекает под действием силы тяжести. В случае тушения пожаров в вертикальных и наклонных стволах пена подается сверху из ближайших горных выработок или с поверхности. При интенсивном пожаре в камерах, не позволяющем приблизиться к очагу, для тушения следует также применить пену. Тушение пожаров пеной в горизонтальных выработках менее эффективно, так как пена растекается по почве на большой поверхности и поэтому трудно заполнить весь объем. По горизонтальным выработкам пену можно подавать на расстоянии 300–600 м.

### **6.7. Тушение пожаров в шахтах, опасных по газу и пыли**

При пожарах в шахтах, опасных по газу и пыли, устанавливаемый вентиляционный режим должен исключать образование на пожарном участке местного или слоевого скопления метана и других горючих газов, вынос из выработанного пространства и других выработок вентиляционного потока с взрывоопасной концентрацией газов или пыли к очагам пожара. Если нарастает концентрация метана в поступающей струе, то принимают меры по снижению этой концентрации (усиление проветривания, дегазация источника поступления метана, изменение схемы подачи воздуха и др.).

В случае непредвиденного изменения режима проветривания на пожарном участке людей, занятых тушением, отводят в безопасное место до выяснения обстановки. При тушении пожара должны быть приняты меры по предотвращению взрыва уголь-

ной пыли (обработка выработок инертной пылью, смыв пыли водой и пр.).

Если пожар осложнился взрывом, работы по тушению прекращают и людей выводят в безопасные места. Перемычки для изоляции пожарного участка в шахтах, опасных по газу и пыли, устанавливаемые во всех выработках на пути возможного распространения взрывной волны, должны быть взрывоустойчивыми. Перемычки в выработках с поступающей в пожарный участок струей и исходящей струей возводятся с вентиляционными проемами. Площадь проемов не допускает накопления взрывоопасного содержания горючих газов, они закрываются взрывоустойчивыми лядами.

Изоляция пожарного участка в шахте, опасной по газу и пыли, осуществляется в следующем порядке:

- определяются границы пожарного участка, места установки перемычек и расход воздуха, необходимый для поддержания взрывобезопасного содержания горючих газов во время изоляционных работ;

- рассчитываются площадь поперечного сечения проемов в перемычках для пропуска необходимого количества воздуха и время образования на участке взрывоопасного содержания метана после закрытия проемов;

- сооружаются взрывоустойчивые перемычки в боковых выработках, закрытие которых не нарушает проветривание пожарного участка;

- прокладываются воздуховоды дистанционного отбора проб воздуха в изолируемом пространстве;

- сооружаются взрывоустойчивые перемычки с проемами на входящей и исходящей струях;

- закрываются проемы в перемычках и осуществляются меры по снятию депрессии с пожарного участка (время накопления взрывоопасного содержания газов должно в два и более раз превышать время, необходимое для закрытия проемов, или они должны закрываться дистанционно).

Если при сооружении взрывоустойчивых перемычек с проемами не удастся сохранить проветривание, обеспечивающее взрывобезопасное содержание горючих газов, осуществляются

меры по инертизации атмосферы пожарного участка и работа проводится в следующем порядке (дополнительные операции):

- определяется объем выработок пожарного участка, подлежащий заполнению инертным газом, выбирается оборудование и способ его подачи;

- рассчитывается необходимое количество инертного газа, интенсивность и продолжительность его подачи;

- после сооружения всех перемычек (боковых и основных с проемами) начинается выпуск инертного газа расчетной интенсивности, закрываются проемы в перемычках.

Если инертный газ можно подать в количестве, равном или большем, чем объем поступающего на пожарный участок воздуха, то выпуск газа может быть начат до возведения изолирующих сооружений.

В выработках, по которым к очагу подается парогазовая смесь, необходимо:

- принимать меры против обрушения пород (дополнительное охлаждение газов, укрепление крепи), если выработки пройдены по мягким и средней крепости породам (наносы, сланцы);

- запрещается выполнять какие-либо работы в зоне установки генератора инертных газов, а также на поступающей струе воздуха к генератору, за исключением контроля параметров атмосферы.

После создания в изолированном пространстве невзрывоопасной атмосферы при необходимости выполняют работы по сокращению объема изолированного пространства. Эти работы допускаются при условии, если процесс поддержания инертной среды в изолированном пространстве является управляемым.

## **6.8. Оценка опасности взрыва горючих газов при пожаре в шахте**

Взрывы горючих газов в шахтах относятся к наиболее опасным авариям и приводят, как правило, к групповому травматизму с тяжелыми последствиями. Наиболее распространенными горючими газами, которые могут выделяться в шахтах и образовывать с воздухом взрывоопасные смеси, являются метан, оксид углерода, водород, этан, ацетилен. Пределы взрываемости в воздухе ок-

сида углерода находятся от 12,5 до 75 %; водорода от 4,1 до 74 %; этана от 3,2 до 12,5 %; ацетилена от 3,0 до 65 %. По мере снижения концентрации кислорода в газовой смеси пределы взрываемости этих горючих газов уменьшаются.

Наиболее часто встречающаяся в шахтах метано-воздушная смесь взрывается при концентрации метана от 5 до 15 %. Наибольшей силы взрыв достигает при концентрации метана 9,5 %, так как в этом случае на его сжигание используется весь кислород воздуха. Температура взрыва метано-воздушной смеси может достигать 2 650 °С, если взрыв произошел в замкнутом пространстве, и 1 850 °С, если продукты взрыва могут свободно распространяться.

Метан – горючий газ, почти в два раза легче воздуха, поэтому скапливается в верхней части горных выработок, заполняя пустоты в кровле. Выделение метана бывает обычное, суфлярное и внезапное. **Обычное выделение** происходит из невидимых пор и трещин в угле по всей обнаженной поверхности. Количество выделяющегося газа зависит от **газоносности пластов** – это количество газа, содержащегося в тонне угля или породы. **Газообильность** шахт определяется по количеству метана, выделившегося в единицу времени (сутки). **Абсолютная газообильность** – это объем метана, выделившийся в шахте за сутки. **Относительная газообильность** – это количество метана, выделившегося в шахте за сутки, отнесенное к 1 т добычи.

**Суфлярное выделение** – это истечение газа, скопившегося в трещинах и пустотах угольного пласта или вмещающих пород, через видимые трещины и отверстия. Суфлярные выделения чаще происходят в районах тектонических нарушений. Продолжительность действия суфляра – от нескольких дней до года и более. **Внезапное выделение** – одновременное выделение (выброс) большого объема газов, сопровождающееся выбросом угольной мелочи от нескольких до сотен и даже тысяч тонн.

Оксид углерода, водород, этилен, ацетилен и некоторые другие горючие газы могут образовываться в шахтах при пожарах. Одним из источников теплового импульса воспламенения метано-воздушной среды или смеси других горючих газов может быть самовозгорание угля, эндогенные и экзогенные пожары в шахтах. Смесь метана с воздухом при температуре 600 °С вос-

пламеняется через 10 с, при 1 000 °С – через доли секунды, а при 1 300 °С взрывается.

Экспериментальные взрывы стехиометрических метано-воздушных смесей показали, что в образуемых смесях концентрация углекислого газа может достигать до 8 %, оксида углерода до 8,5 %, водорода до 10 %.

Пределы взрываемости смесей метана с воздухом можно определить по «треугольнику взрываемости» (рис. 6.8). «Треугольники взрываемости» горючих газов строят по экспериментальным данным, полученным на лабораторной установке. Эксперименты, проведенные со смесями газов, показали, что взрывоопасные концентрации расположены в области, имеющей форму треугольника (область 2).

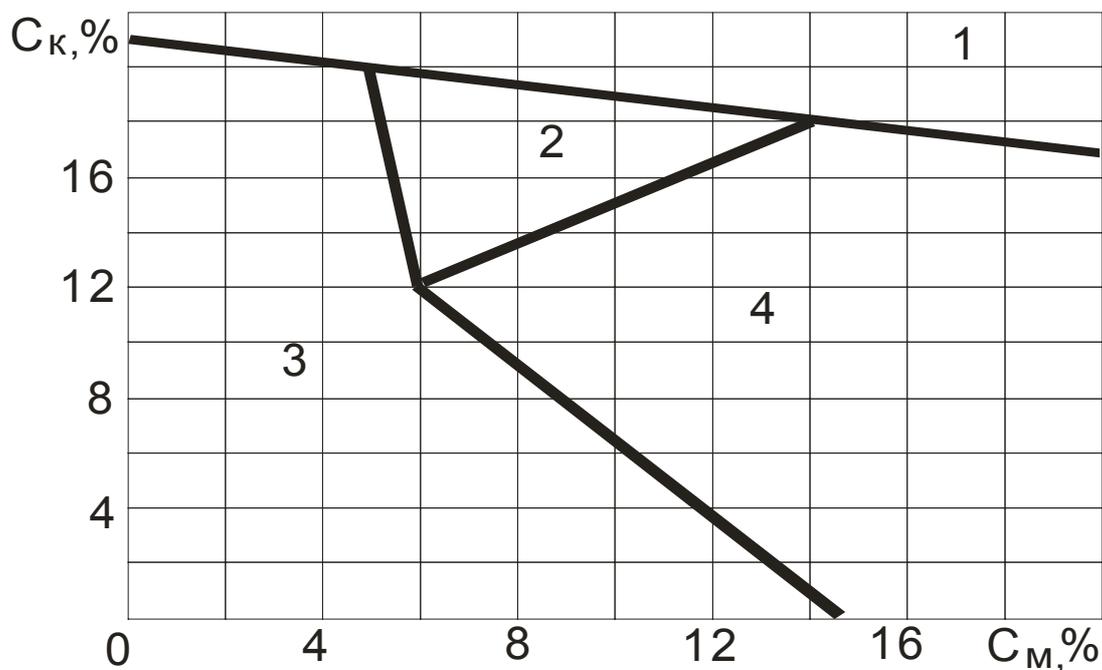


Рис. 6.8. Объемные пределы взрываемости метано-воздушных смесей: 1 – несуществующая смесь; 2 – взрывчатая смесь; 3 – невзрывчатая смесь; 4 – смесь, способная стать взрывчатой при добавлении воздуха

Из рис. 6.8 видно, что с падением концентрации кислорода наблюдается постепенное сужение нижнего и верхнего пределов взрываемости смеси метана с воздухом вплоть до выхода в точку при объемной доле кислорода, равной 12,2 %. Это связано с цеп-

ным механизмом передачи теплового импульса зажигания. В области 3 для осуществления цепной реакции окисления недостаточно молекул метана, в области 4 – молекул кислорода.

«Треугольник взрываемости» для других горючих газов имеет тот же вид, что и для метана. Взрываемость смеси горючих газов при подземных пожарах также определяется с помощью «треугольника взрываемости».

Для оценки взрываемости смеси горючих газов вначале определяется общее содержание горючих газов (%). Для наиболее распространенных в угольных шахтах горючих газов используется формула

$$C_{\Gamma} = C_{\text{M}} + C_{\text{O}} + C_{\text{B}}, \quad (6.1)$$

где  $C_{\text{M}}$ ,  $C_{\text{O}}$ ,  $C_{\text{B}}$  – концентрация соответственно метана, оксида углерода и водорода, %.

Затем рассчитывают долю каждого горючего газа в смеси:

$$P_{\text{M}} = C_{\text{M}}/C_{\Gamma}; \quad P_{\text{O}} = C_{\text{O}}/C_{\Gamma}; \quad P_{\text{B}} = C_{\text{B}}/C_{\Gamma}. \quad (6.2)$$

Правильность расчета проверяется по соотношению

$$P_{\text{M}} + P_{\text{O}} + P_{\text{B}} = 1. \quad (6.3)$$

По полученным данным определяют местонахождение данной смеси на соответствующем графике (рис. 6.9–6.14). В случае если найденная точка находится внутри «треугольника взрываемости», то газовая смесь может взорваться. Так, отбор проб газа из атмосферы пожарного участка показал, что газовая смесь содержит кислорода ( $C_{\text{K}}$ ) 15 %, оксида углерода ( $C_{\text{O}}$ ) 0 %, метана ( $C_{\text{M}}$ ) 2,1 % и водорода ( $C_{\text{B}}$ ) 1,4 %. По формуле (6.1) подсчитываем, что концентрация горючих газов ( $C_{\Gamma}$ ) равна 3,5 %. Доля оксида углерода в смеси горючих газов ( $P_{\text{O}}$ ) равна 0, а доля метана ( $P_{\text{M}}$ ) составляет 0,6. Данную точку X наносим на график рис. 6.9. Из графика видно, что точка X расположена вне «треугольника взрываемости», но вблизи нижнего предела взрываемости смеси.

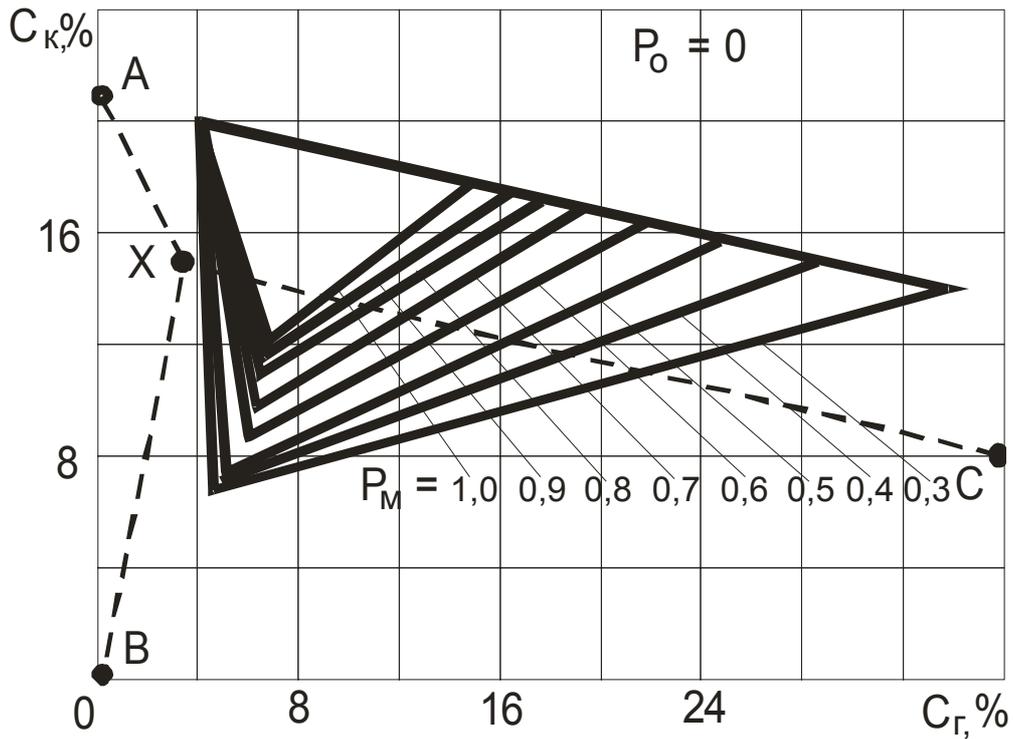


Рис. 6.9. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при отсутствии оксида углерода ( $P_0 = 0$ )

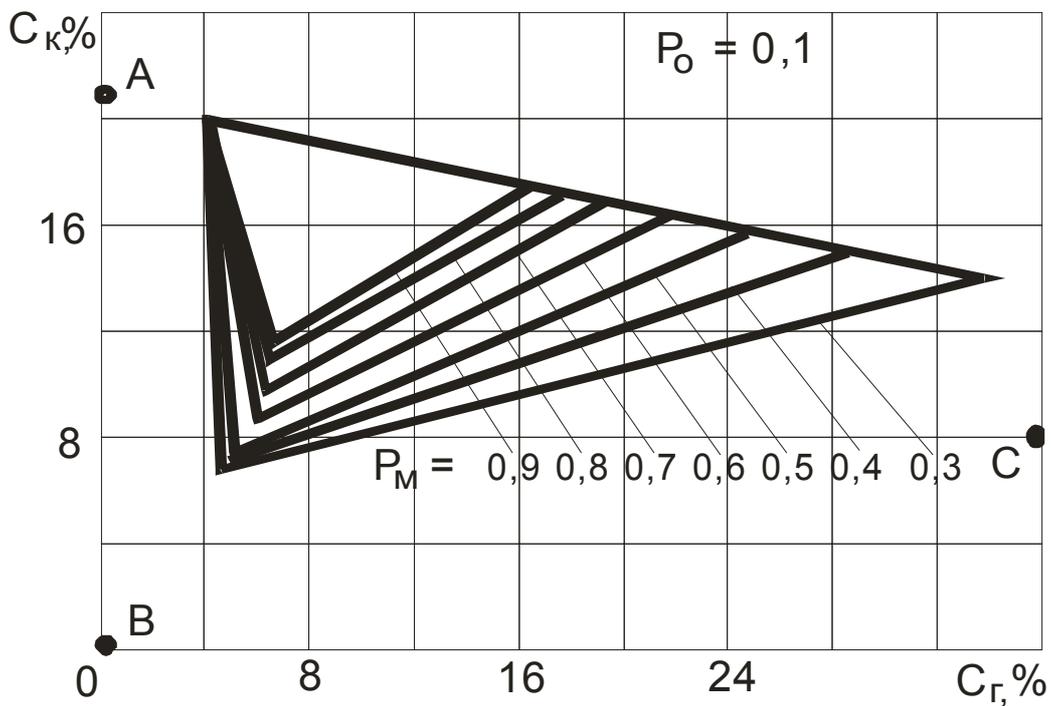


Рис. 6.10. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,1

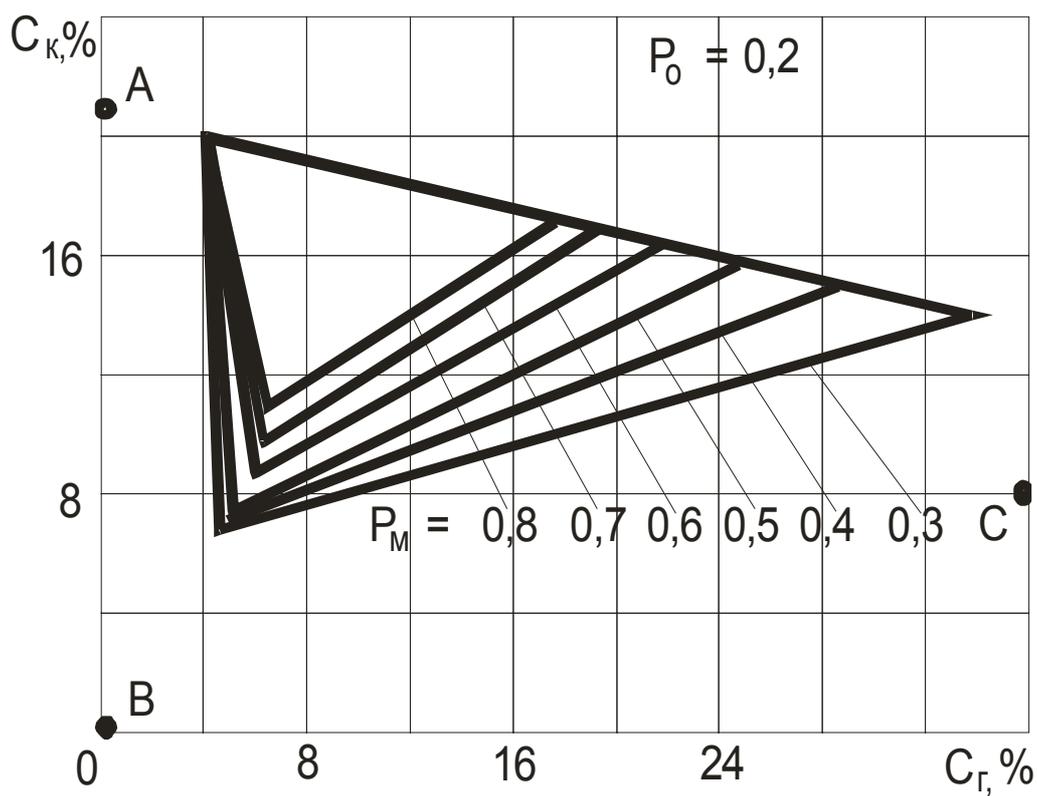


Рис. 6.11. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,2

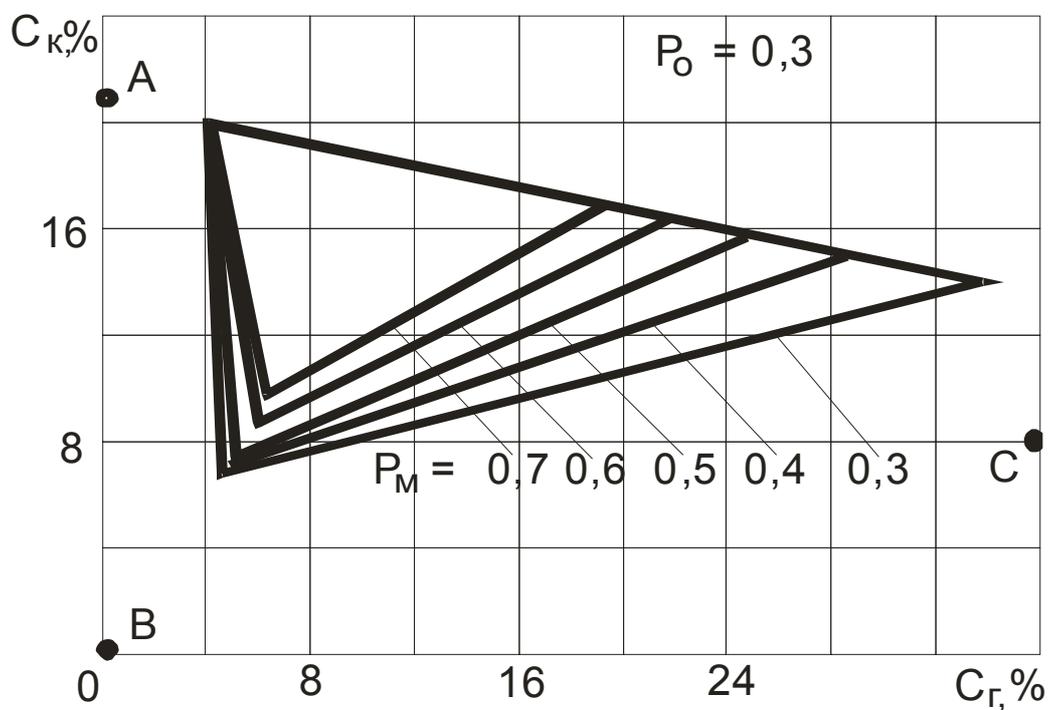


Рис. 6.12. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,3

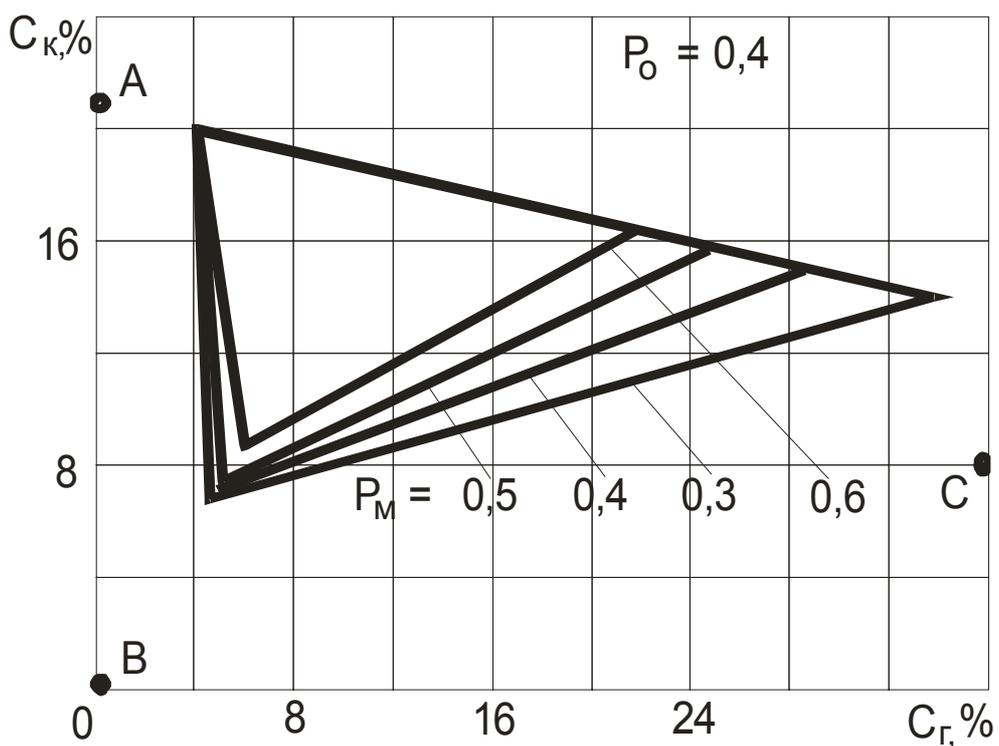


Рис. 6.13. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,4

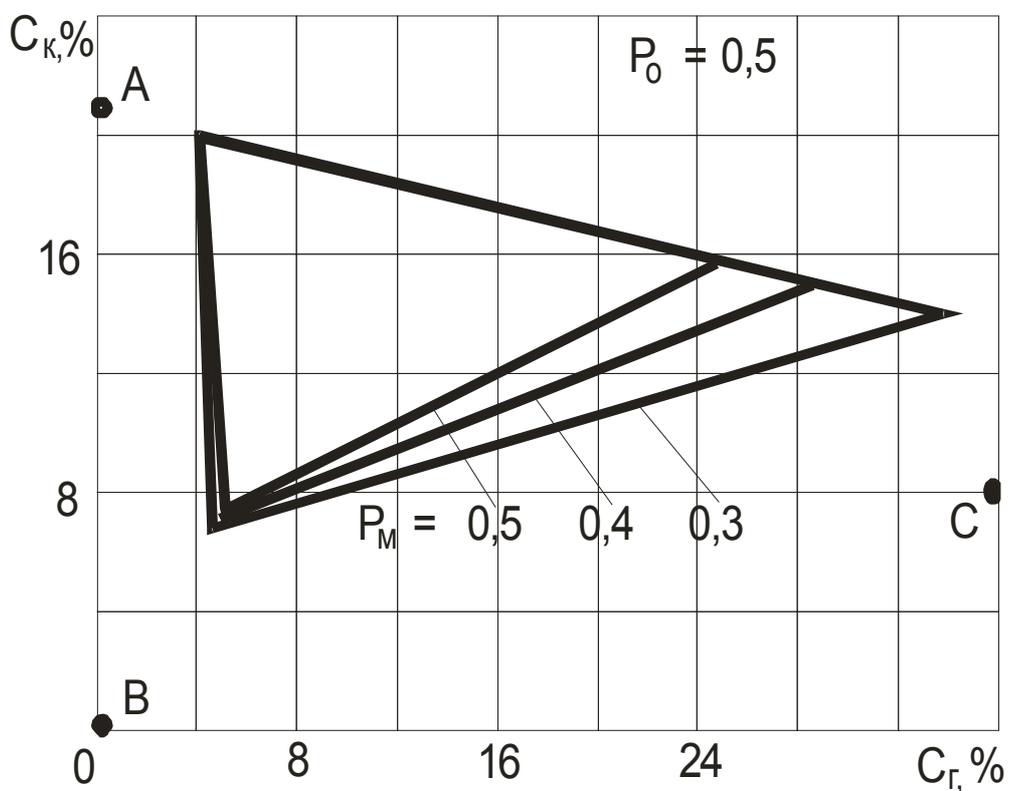


Рис. 6.14. «Треугольники взрываемости» смеси горючих газов при доле оксида углерода 0,5

По графику расположения зоны взрываемости горючих газов можно определить, куда будет смещаться точка, отображающая соответствующую газовую смесь, в случае изменения концентрации составляющих ее компонентов (кислорода, горючих газов и инертных газов). Так, линия, соединяющая полученную точку X с точкой A, покажет, куда будет смещаться смесь в случае увеличения подачи свежего воздуха и, соответственно, роста в ней концентрации кислорода. Из рис. 6.9 видно, что добавление свежего воздуха приведет к снижению концентрации горючих газов и удалению смеси от «треугольника взрываемости».

Перемещение точки X по линии, соединяющей ее с точкой B, происходит в случае, если в смесь газов будут добавляться инертные газы (азот, углекислый газ), не поддерживающие горения и снижающие концентрации в смеси кислорода и горючих газов. Согласно рис. 6.9 такое воздействие также удаляет смесь от «треугольника взрываемости», что уменьшает опасность взрыва смеси.

В случае дополнительного выделения горючих газов, приводящего к увеличению их содержания в смеси, точка X, отображающая состояние смеси газов, начнет перемещаться к точке C. Для приведенного на рис. 6.9 примера это означает вхождение в «треугольник взрываемости» и образование взрывчатой смеси.

Таким образом, использование «треугольников взрываемости» в шахтах при тушении пожаров позволяет не только оценить возможность взрыва образующейся смеси газов, но и проанализировать, как будет изменяться ситуация в пожарном участке в случае увеличения выделения горючих газов, усиления проветривания или при подаче инертных газов. Соответственно появляется возможность выбора наиболее эффективного способа предотвращения взрыва горючих газов.

## **6.9. Локализация и тушение эндогенных пожаров в выработанном пространстве**

Борьба с эндогенными пожарами, возникшими в выработанном пространстве, значительно затруднена по следующим причинам:

- трудно, а иногда невозможно точно определить местонахождение очага, его температуру и размеры;
- невозможен непосредственный доступ к очагу;
- затруднен контроль за эффективностью принимаемых мер по тушению пожара.

В большинстве случаев для ликвидации таких пожаров применяют пассивный или комбинированный способ тушения, предусматривающий изоляцию аварийного участка перемычками. Однако в случае развития процесса самовозгорания в выработанном пространстве действующих выемочных полей изоляция наносит огромный экономический ущерб шахтам из-за потерь дорогостоящей угледобывающей техники.

С целью снижения потерь от таких пожаров возникло новое направление защиты выемочных полей в борьбе с самовозгоранием угля – локализация очагов самовозгорания в выработанном пространстве без изоляции действующих полей и потери уровня добычи. Реализация поставленной цели возможна путем снижения воздухопроницаемости выработанного пространства, что позволит уменьшить приток кислорода к очагу и вынос токсичных продуктов горения в действующие выработки.

**Локализация эндогенных пожаров в выработанном пространстве действующих выемочных полей.** В основу этого направления положены следующие предпосылки:

- большая продолжительность процесса самовозгорания и возможность его обнаружения на ранней стадии;
- самовозгорание в выработанном пространстве носит очаговый характер и небольшие размеры;
- при наличии очага в выработанном пространстве содержание продуктов горения в атмосфере очистного забоя может находиться в пределах санитарных норм.

Рост температуры очага самовозгорания можно остановить на любой стадии путем уменьшения притока свежего воздуха и инертизации атмосферы. Этого эффекта можно достичь путем создания на пути утечек воздуха в выработанном пространстве воздухонепроницаемой завесы. Аналогичный эффект достигается за счет увеличения скорости подвигания очистного забоя, что приводит к росту аэродинамического сопротивления на пути свежего воздуха.

Исследования показали, что наиболее эффективно для создания завесы в выработанном пространстве применение пены, которая способна длительное время сохраняться в скоплении угля и пород, являясь препятствием на пути движения утечек воздуха. Так, в насыпке угля фракции 16–25 мм после пропитки скопления пеной практически полностью прекращается фильтрация воздуха. Разрушение пенной завесы в скоплении угля возможно только после резкого увеличения перепада давления воздуха. Аналогичные результаты были получены в шахтах, где пена подавалась в выработанное пространство. Так, установлено, что величина утечек сокращается в 2–3 раза после разового заполнения обрушенных пород объемом пены. Причем шахтные исследования показали, что стойкость пены в порах и трещинах угольного скопления существенно выше, чем у пены в свободном состоянии. При увеличении поданных в выработанное пространство объемов пены ее стойкость также увеличивается. В экспериментах утечки восстанавливались через 3–8 сут после подачи пены.

С целью повышения эффективности применения пены для локализации эндогенных пожаров необходимо увеличение стойкости пен, которая приводит к уменьшению периодичности обработки выработанного пространства. В качестве добавок – стабилизаторов пены можно применять студнеобразующие высокомолекулярные, полимеризующиеся, кристаллизационно твердеющие и тонкодисперсные вещества. К студнеобразующим высокомолекулярным веществам относятся альгинаты, карбоксиметилцеллюлоза, защитные коллоиды; к полимеризующимся – алкилфенолы, бифенолы, ароматические амины, фосфиты и др.

Наиболее доступный и дешевый способ стабилизации пен – это добавка материалов, состоящих из мелкодисперсных частиц, например глины, отходов флотации углеобогащения, золы электростанций и т. д. Стабилизирующее действие мелкодисперсной фазы в жидкости с раствором поверхностно-активных веществ объясняется возникновением сил отталкивания между частицами, покрытыми слоем длинных цепочных молекул. В результате действия стерических сил в пленке образуется устойчивая структура из мелкодисперсных частиц, препятствующая стеканию жидкости. Стойкость вспененных суспензий увеличивается в 10–20 раз по сравнению с водовоздушной пеной.

У стабилизирующих добавок существует оптимальная концентрация, позволяющая увеличить получаемый объем пены в 2–7 раз. Их оптимальные концентрации в пенообразующей жидкости составляют: CaCl – 0,2 %; КМЦ – 1,0 %; алюминиевый порошок – 0,2 %; глина – 20 %. Для стабилизации пен при борьбе с эндогенными пожарами в Кузбассе рекомендовано использовать глинистую суспензию (глина – наиболее дешевый и доступный материал) с соотношением Т : Ж = 1 : 4. При этой концентрации глины стойкость пены возрастает в 8 раз, а получаемый объем пены увеличивается в 7 раз. Однако присутствие глины исключает генерацию пены способом продавливания на сетке. Вспенивание глинистой пульпы осуществляется путем турбулизации потока суспензии с эжекцией воздуха при помощи устройства УВГП.

С целью снижения концентрации кислорода в выработанном пространстве целесообразно использовать пену, газовой фазой которой является инертный газ. Обычно для вспенивания применяется азот, как наиболее доступный инертный газ. Для транспортирования, хранения и выдачи азота, а также для получения пены с целью локализации и тушения эндогенных пожаров используется специальное оборудование.

Для борьбы с подземными эндогенными пожарами на шахтах применяется оборудование как вновь разработанное, так и серийного производства. Установка передвижная азотозаправочная УПА-8/0,25 предназначена для длительного хранения, транспортирования и заправки жидким азотом емкостей потребителей (стационарные поверхностные комплексы шахт и отдельные установки по приготовлению инертных пен и вспененных суспензий, расположенные на шурфах, на групповых или на индивидуальных скважинах). В комплект установки входит транспортная цистерна типа ЦТК (емкость 8 м<sup>3</sup>, рабочее давление 0,25 МПа), смонтированная на платформе автомобиля КрАЗ 257 и состоящая из внутреннего сосуда, кожуха, двух испарителей наддува и пульта управления с арматурой, контрольно-измерительных приборов и предохранительных устройств.

Установка газификационная автомобильная АГУ-8К предназначена для хранения и транспортирования жидкого азота, его газификации на месте потребления до давления 19,6 МПа. Конструкцией установки предусмотрена заправка резервуаров холод-

ных криогенных газификаторов сжиженным газом. Производительность по газообразному азоту 420 м<sup>3</sup>/ч. Наибольшее давление газа на выходе составляет 22 МПа. Количество заливаемого жидкого азота 4 200 кг. Установка АГУ-8К смонтирована на платформе автомобиля КраЗ-257 и состоит из узла выдачи и щита управления. Узел выдачи включает насос и испаритель, заполненный водой, подогреваемой электронагревателями. Установку АГУ-8К используют для получения и подачи инертной пены при локализации и тушении эндогенных пожаров по скважинам с поверхности. Для генерации пены можно использовать генератор азотный типа ГПА-1 или устройство для вспенивания глинистой пульпы УВГП-4.

Стационарная газификационная установка СГУ-8000-500/200 предназначена для хранения и газификации жидкого азота. Используется в качестве комплектующего изделия в стационарных поверхностных комплексах по приготовлению инертных пен. Вместимость емкости равна 5 670 кг жидкого азота, производительность по газу 420 м<sup>3</sup>/ч. Установки СГУ-8000 и СГУ-7К состоят из стандартной цистерны ЦТК-8/025, насосного агрегата, испарителя, коллектора с арматурой, щита управления и силового щита. Цистерна представляет собой двухстенный сосуд, межстенное пространство которого заполнено изоляционным материалом. Испаритель заполнен водой, подогреваемой электронагревателями. На коллекторе установлены манометры, предохранительный клапан, датчики приборов контроля и регулировки. Отличительной особенностью установки СГУ-7К является ее комплектование насосами с вертикальным расположением цилиндрической группы, которые смонтированы на горловине резервуара.

Газификаторы холодные криогенные ГХК предназначены для хранения и газификации жидкого азота с автоматическим поддержанием заданных величин расхода и давления. Газификаторы устанавливаются под открытым небом и не требуют источников энергии. Входят в состав поверхностных комплексов по приготовлению инертных пен и вспененных суспензий. Состоят из резервуаров для хранения и выдачи жидкого продукта, испарителей, а также арматуры и трубопроводов. Газификаторы с гидравлической емкостью 8,0 м<sup>3</sup> отличаются друг от друга коли-

чеством испарительных блоков, характеризующих производительность по газообразному продукту. Рабочее давление получаемого газа 1,6 МПа. Для ограничения давления в сосуде и коммуникациях изделия в арматурном шкафу имеются предохранительные клапаны на давление 1,8–1,85 МПа. Если предохранительный клапан не срабатывает, то предусмотрена предохранительная мембрана, разрывающаяся при давлении 1,9–2,05 МПа.

Подземная газификационная установка ПГХКА-1,0-0,3/1,6 предназначена для хранения, транспортирования по горным выработкам и холодной газификации жидкого азота при горноспасательных работах, предупреждении, локализации и тушении эндогенных пожаров в шахтах. Производительность по газообразному азоту 300 м<sup>3</sup>/ч, объем (2 резервуара) 1,0 м<sup>3</sup>. Рабочее давление на выходе азота из испарителя 1,6 МПа. Установка состоит из блоков резервуаров и испарителя, соединенных гибким металлическим рукавом и размещенных каждый на отдельной платформе шахтной вагонетки. Блок резервуаров включает два резервуара РЦВ-0,5/1,6 с испарителями, щит переключения и соединительные трубопроводы. Для ограничения давления в сосуде имеется предохранительный клапан на давление 1,76–1,84 МПа и предохранительная мембрана на 2,0 МПа.

Установка газификационная азотная предназначена для газификации жидкого азота и подачи газообразного продукта под давлением 1,96 МПа в шахтный трубопровод или на устройство для получения инертной пены или вспененной суспензии. Питание газификационной установки осуществляется от электросети потребителя (шахты). Производительность по газообразному азоту 100 м<sup>3</sup>/мин. Максимальное давление газа на выходе 2 МПа. Установка размещается на прицепе к автомобилю КраЗ-257 и содержит испаритель, насосный агрегат, подогреватель и пульт управления.

Испаритель состоит из двух блоков, каждый из которых соединен с одним из насосных агрегатов. Воздух на обдув испарителей подается осевыми вентиляторами СВМ-6М. Испарительные блоки соединены с подогревателем, представляющим водяную ванну со змеевиком и электронагревателями. При работе установки жидкий азот из железнодорожной цистерны или из цистерны типа ЦТК (установки УПА-8/0,25, АГУ-8К) поступает в

испаритель, где он испаряется, поглощая тепло из воздуха, нагнетаемого вентилятором. Газообразный азот перемещается в подогреватель, в котором нагревается до необходимой температуры и подается потребителю.

Установка транспортирования жидкого азота УТЖА-2М предназначена для хранения, транспортирования и выдачи жидкого азота при работе в подземных выработках шахт с рельсовым путем. Используется для предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров с применением инертной пены или жидкого азота. Тип резервуаров РЦВ-0,5/1,6, емкость двух резервуаров 1,0 м<sup>3</sup>. Масса заливаемого азота 760 кг, рабочее давление газа 1,6 МПа. Установка состоит из двух резервуаров на платформе шахтной вагонетки и оборудования для получения и подачи инертной пены (генератор азотной пены ГПА-1, противопожарная пика ПРЛ-1, устройство запорное азота УЗА-1, переходники, трубопроводы).

Установка азотная шахтная «Азот» предназначена для хранения, транспортирования и выдачи жидкого азота при горноспасательных работах в подземных выработках шахт с рельсовым путем. Используется в технологических схемах предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров с применением инертной пены или жидкого азота. Транспортируется шахтными электровозами. Тип цистерны ЦТК-1/0,25, емкость 1,0 м<sup>3</sup>, рабочее давление 0,25 МПа. Состоит из цистерны, закрепленной на платформе шахтной вагонетки типа ВГ-3,3-900, и комплекта оборудования для получения и подачи инертной пены. Цистерна включает сосуд, кожух, два испарителя наддува и пульт управления с арматурой, контрольно-измерительными приборами и предохранительными устройствами.

Установки напорные пенного пожаротушения УЛЭП-2 и «Экран» предназначены для получения пены и нагнетания ее под давлением в обрушенные уголь и породу. Могут использоваться для предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров в отработанной части пластов, а также для тушения пожаров в куполах горных выработок, пустотах за бетонной крепью капитальных горных выработок, камер и т. п. Условием их применения является наличие сжатого инертного газа (или воздуха) и воды. В качестве источника сжатого газа (воздуха) применяются

газификационные установки (компрессоры).

Производительность по пене УЛЭП-2 составляет  $2 \text{ м}^3/\text{мин}$ , кратность пены от 100 до 150. Напор раствора пенообразователя  $0,3\text{--}0,5 \text{ МПа}$ . Установка включает пеногенератор, смеситель, трубопроводы и краны для подачи воды, воздуха и пенообразователя, фильтры очистки пенообразователя и воды, манометры для измерения давления воды, воздуха и пены.

Пеногенератор «Экран» состоит из корпуса, снабженного быстросменной пеногенераторной кассетой, штуцеров подвода воздуха и раствора пенообразователя, распылителя, распределительной камеры и фланца для подсоединения к магистральному пенопроводу. Установки готовят к работе непосредственно у скважин, пробуренных в выработанное пространство пласта. Скважины должны быть обсажены трубами с условным проходом не менее 80 мм и иметь фланцы для подсоединения пеногенератора.

Генератор азотной пены ГПА-1 предназначен для генерирования инертной пены и нагнетания ее под давлением по трубопроводам и скважинам в выработанное пространство для профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров. Минимальное давление воды для стабильной работы генератора равно  $0,4 \text{ МПа}$ . Производительность по пене  $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , расход жидкого азота  $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , кратность получаемой пены 30–80. Генератор состоит из устройства инертизации пены, переходника с соединительной головкой для подачи воды, пеносмесителя для эжекции пенообразователя, измерительной вставки, колена для подсоединения к магистральному трубопроводу или к обсадной трубе скважины. В подземных условиях генератор ГПА-1 работает в комплексе с установкой УТЖА-2М, а на поверхности подачу жидкого азота обеспечивают от любой цистерны для хранения и выдачи жидкого азота (ЦТК-1,0/0,25; ЦТК-8/0,25; УПА-8/0,25; РЦВ-0,5/1,6 и др.).

Устройство для вспенивания глинистой пульпы УВГП-4 предназначено для получения вспененной глинистой пульпы и нагнетания ее по скважинам в отработанное пространство для предупреждения, локализации и тушения эндогенных пожаров. Глинистую пульпу подают насосом к обсадной трубе скважины. Пенообразователь эжектируют или подают насосом из любой ем-

кости. Газ подается от автомобильных газификационных установок типа АГУ-8К или из соседней скважины. Кратность получаемой пены равна 10, расход глинистой пульпы при давлении 0,4 МПа равен 1,17 м<sup>3</sup>/мин. Производительность устройства по пене равна 12,0 м<sup>3</sup>/мин. УВГП-4 – струйный аппарат эжекционного типа, состоящий из насадки-распылителя, заключенной в герметичный кожух, с патрубками для подачи пенообразователя и подвода воздуха (инертного газа), калиброванной гильзы с активатором для диспергирования потока и колена с манометром для измерения давления пульпы. Устройство УВГП-4 устанавливается на обсадную трубу скважины и посредством колена соединяется с пульповодом.

Пеногенератор центробежный «Циклон» предназначен для получения водовоздушной, инертной пены или вспененной суспензии и нагнетания ее в отработанное пространство пластов. «Циклон» можно использовать для тушения пожаров в куполах и пустотах за бетонной крепью горных выработок, камер и в других труднодоступных местах. Обязательным условием его применения является наличие источников подачи воздуха (газа), воды или суспензии и пенообразователя. Производительность пеногенератора по пене 15 м<sup>3</sup>/мин, кратность пены 70–140. Рабочее давление в пеногенераторе 1,6 МПа. «Циклон» состоит из цилиндрического корпуса с патрубками, конфузора, гофрированной обечайки и форсунки с патрубком. Патрубки снабжены гнездами для установки манометра. Подсоединяется пеногенератор к фланцу магистрального пенопровода или к обсадной трубе скважины с условным проходом 100 мм. К патрубку форсунки подключается трубопровод подачи раствора пенообразователя.

Поверхностный комплекс по приготовлению инертных пен и вспененных суспензий предназначен для приготовления инертных пен и вспененных суспензий и подачи их по трубопроводам в любую точку шахтного поля. Здание комплекса расположено у групповой скважины, шурфа или у ствола в середине шахтного поля из расчета обработки наиболее удаленных выемочных полей. Размеры здания комплекса: длина 13,6 м; ширина 8,5 м; высота 3,5 м. Здание состоит из трех помещений, где размещаются установки типа СГУ-8000-500/200, ЦТК-8/0,25.

Общее количество жидкого азота, хранимое на комплексе, составляет  $16,0 \text{ м}^3$ , что позволяет получать  $9,5 \text{ тыс. м}^3$  инертной пены. В помещении установлены баки для пенообразователя емкостью  $10\text{--}15 \text{ м}^3$ , глинистой пульпы (воды) вместимостью  $15\text{--}20 \text{ м}^3$ , насосы, генератор инертной пены (ГПУ), пульповод и водовод. Здесь можно также разместить дополнительные баки для хранения стабилизаторов и антипирогенов. Производительность комплекса определяется газификационной установкой, а кратность пены изменяется от 10 до 100. Подача пенообразователя регулируется насосом-дозатором. Здание комплекса строится из негорючих материалов, снабжается вытяжной вентиляцией, общим газосбросом за пределы здания, системой отопления и связью.

**Технологические схемы локализации и тушения эндогенных пожаров пеной.** Разработанные технологические схемы применяются в различных ситуациях для локализации и тушения очагов самовозгорания угля в шахтах водовоздушной, инертной пеной и вспененной суспензией. Схема (рис. 6.15) применяется для локализации очага эндогенного пожара (самонагревания) в действующем выемочном поле пластов пологого и наклонного падения при использовании бесцеликовой выемки угля с сохранением конвейерного штрека. Локализация осуществляется инертной пеной или вспененной глинистой пульпой. Пенные завесы создаются путем подачи пены за комплекс в зону повышенной воздухопроницаемости у вентиляционного и конвейерного штреков. Ширина пенных завес определяется величиной зоны фильтрации пожарных газов в выработанном пространстве и может колебаться в пределах  $10\text{--}15 \text{ м}$ .

Приготовление вспененной глинистой пульпы или инертной пены происходит на поверхности, а подают ее подземным способом от групповой скважины по трубопроводам. В обрушенные породы пена нагнетается по трубопроводу 5, прокладываемому по почве пласта вдоль верхнего и нижнего бортов лавы. На конце трубопровода закреплен перфорированный отрезок 1. Если фильтрация воздуха продолжается, то дополнительно для подачи пены устанавливаются вдоль лавы отрезок 2, что позволяет существенно увеличить размер пенной завесы в выработанном пространстве. Длина этого трубопровода определяется размерами

зоны фильтрации пожарных газов. Дополнительный трубопровод по лаве прокладывают перед обрушением кровли, а пену подают после перехода по нему комплекса. Время заполнения, необходимый объем пены и ее компоненты определяется по формулам (5.7)–(5.11) отдельно для каждой пенной завесы.

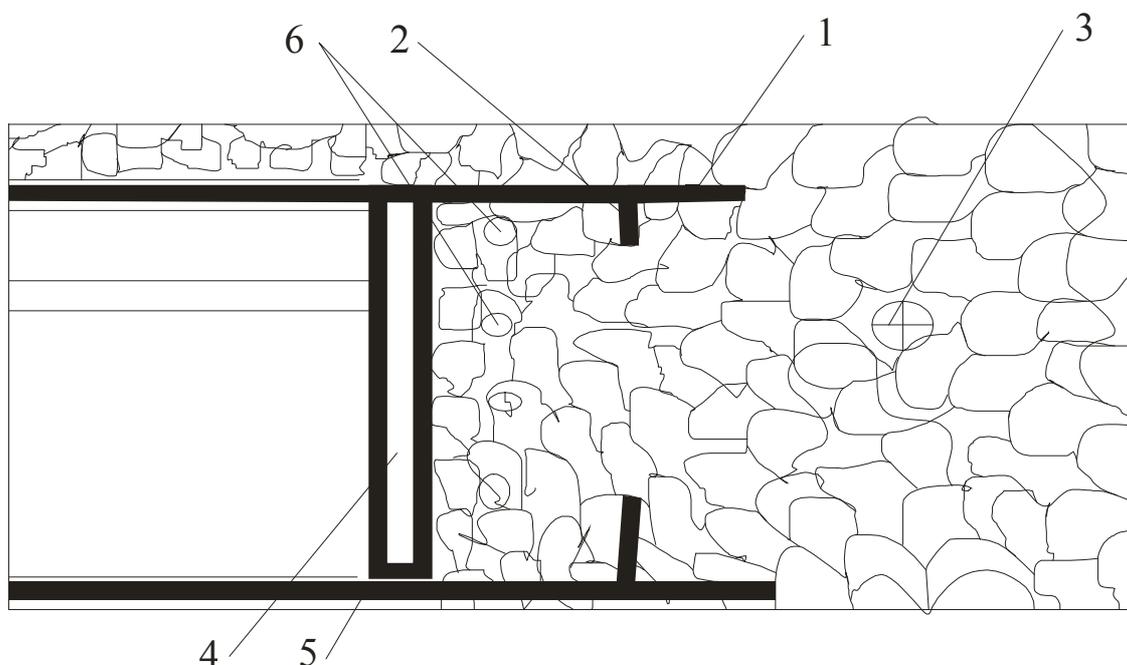


Рис. 6.15. Схема локализации эндогенного пожара в действующем выемочном поле на пластах пологого падения: 1 – перфорированный отрезок трубопровода; 2 – перфорированный трубопровод вдоль очистного забоя; 3 – очаг самонагрева; 4 – механизированный комплекс; 5 – скважины с поверхности

Схема (рис. 6.16) применяется для локализации очага эндогенного пожара на ранее отработанном вышележащем горизонте пластов крутонаклонного и крутого падения. При отработке выемочного поля столбами по падению воздухонепроницаемую завесу создают в отработанной части действующего щитового столба путем подачи инертной пены или вспененной глинистой пульпы (ВГП) по скважинам с поверхности, из полевых выработок или из выработок сближенных пластов.

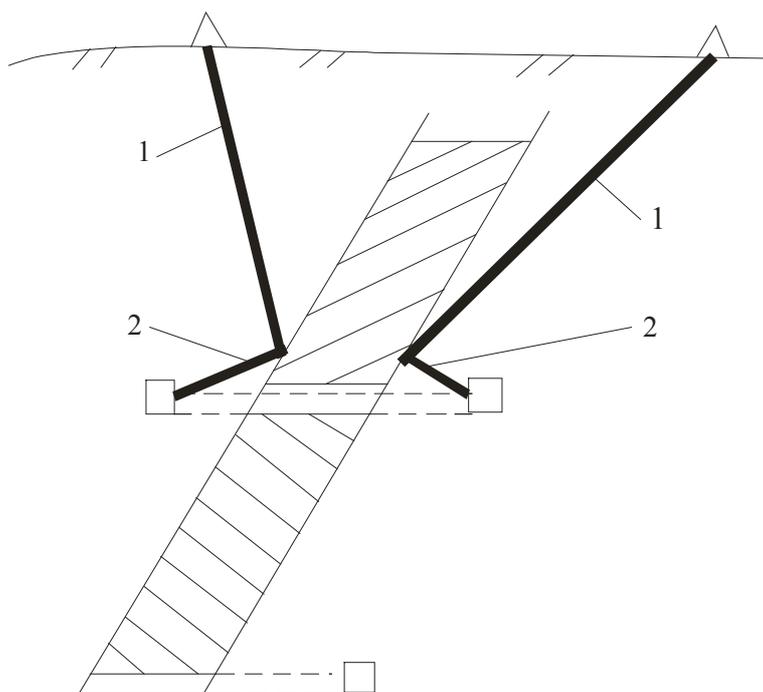


Рис. 6.16. Схема локализации эндогенного пожара на пластах крутого падения: 1 – скважины с поверхности; 2 – подземные скважины из горных выработок

Скважины на всю длину обсаживают трубами диаметром 80–100 мм. На каждый отработываемый столб бурят по две скважины. Инертную пену можно подавать только в одну скважину, вторая при этом является резервной. При подземном способе обработки инертную пену или ВГП подают от поверхностного комплекса по групповой скважине и трубопроводам до скважин 2 на отработываемый столб. Подачу пены осуществляют из расчета полного заполнения пустот в обрушенных породах действующего столба, но во избежание нарушения проветривания поля прекращают после выхода пены в рабочее пространство.

Схема (рис. 6.17) применяется для тушения эндогенного пожара в выработанном пространстве на пластах пологого и наклонного падения с использованием инертной пены или ВГП. Скважины бурят в выработанное пространство с поверхности или из выработок сближенного пласта. Первый ряд скважин располагают в 30 м от забоя (целика), каждый последующий ряд – в 30 м от предыдущего. Пену подают до полного заполнения пустот в выработанном пространстве в районе очага пожара. Обработку

инертной пеной (ВГП) повторяют до получения положительного эффекта. Если нагнетание пены ведут с поверхности, то целесообразно подачу вести одновременно в две скважины. При перебоях в доставке жидкого азота в качестве газообразной фазы можно использовать шахтный воздух из соседней выдающей скважины с малым содержанием кислорода.

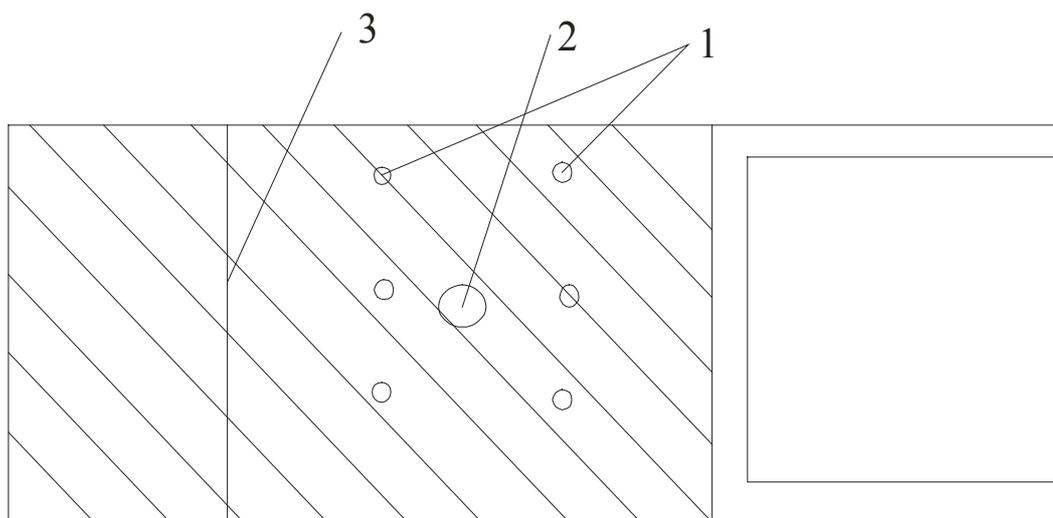


Рис. 6.17. Расположение скважин при тушении пожаров на пластах пологого и наклонного падения: 1 – скважина; 2 – очаг пожара; 3 – граница пожарного участка по простиранию

### **6.10. Применение заиливания, инертных газов и затопления для тушения пожаров**

Способ заиливания предусматривает изоляцию пожарного участка перемычками с последующей подачей глинистой пульпы. Попадая в очаг, пульпа охлаждает разогретый уголь, сокращает прососы воздуха. Способ заиливания применяется при борьбе с труднодоступными очагами, когда невозможно активное тушение, а изоляция малоэффективна из-за трещиноватости пород в местах возведения перемычек или наличия аэродинамической связи с поверхностью.

Для уменьшения уноса глинистых частиц в пульпу добавляют коагулянты, способствующие быстрому осаждению твердых частиц. Могут добавляться антипирогены (серноокислый алюминий, хлористый кальций, гашеная известь и пр.), снижаю-

щие химическую активность угля. После прекращения подачи пульпы трубопроводы необходимо промыть водой с добавкой антипирогенов. Приготовление пульпы осуществляется на поверхности или в подземных выработках. На поверхности пульпа готовится в карьерах механическим или гидромеханическим способом (струей воды размывают глину).

При тушении пожаров на глубине до 200 м применяют в основном нисходящий способ заиливания через скважины, пробуренные с поверхности, а более 200 м – как нисходящий, так и восходящий способы заиливания из горных выработок по скважинам и пульпопроводам. Скважины, пробуренные с поверхности, располагают обычно в шахматном порядке на расстоянии 5–10 м друг от друга. В зоне очага не более 5 м, а при удалении 10 м. Движение пульпы по скважинам и пульпопроводам происходит под давлением, развиваемым землесосом, и за счет статического давления, возникающего при разности высот.

К недостаткам способа заиливания относятся: возможность прорыва пульпы в действующие выработки, загрязнение их илом, неравномерное проиливание выработанного пространства, трудность подачи пульпы в заданную точку, особенно при разработке сближенных пластов на глубине свыше 200 м, необходимость откачки воды, большие затраты на восстановление горных выработок при вскрытии участков.

**Применение инертных газов.** В последние годы инертный газ активно используется для тушения и локализации пожаров как самостоятельное средство. Наиболее распространенным инертным газом является азот, нередко являющийся на предприятиях побочным продуктом при получении кислорода. В основном азот используется как в качестве хладагента, так и для предотвращения взрывов горючих газов, а также для принудительного выноса остаточной концентрации оксида углерода из изолированного участка после окончания тушения (при оценке эффективности тушения пожара). Для удобства азот хранится и транспортируется в жидком виде при температуре  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , имеет плотность  $808\text{ кг/м}^3$ . Энергия диссоциации молекул азота очень велика ( $942\text{ кДж/моль}$ ), поэтому диссоциация становится заметной при температуре около  $2\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Азот, по сравнению с другими газами, имеет следующие преимущества при борьбе с подземными пожарами:

– равномерно распространяется в атмосфере пожарного участка из-за плотности, близкой к плотности воздуха;

– малые потери на пути движения из-за незначительной сорбции углем и породами (в 20–40 раз меньше углекислого газа);

– большой объем газа при испарении из жидкого азота (образуется 854 м<sup>3</sup> газа из 1 т).

Охлаждающий эффект от 1 т жидкого азота при подаче к очагу самовозгорания с последующим нагревом газа до 100 °С равен 508 МДж. Теплосъем при подаче 1 т воды с температурой 20 °С на очаг при ее испарении равен 2 591 МДж. При теплоте парообразования 2 256,7 МДж, затраты тепла на нагрев воды от 20 до 100 °С равен 335 МДж. Из приведенных данных видно, что для низкотемпературных очагов (до 100 °С) жидкий азот является лучшим хладагентом, чем вода. Эффективность азота оказывается выше и при тушении очагов с неизвестным местонахождением, и отвод тепла обусловлен снижением температуры окружающей среды. Однако тушение пожаров непосредственной подачей жидкого азота в очаг может быть опасно, так как за счет интенсивного испарения давление газа резко возрастает. При подаче азота в выработанное пространство необходим усиленный контроль за содержанием кислорода в выработках, примыкающих к заполняемому газом участку.

**Затопление пожарного участка.** В случае неэффективности применяемых способов тушения пожара и дальнейшего распространения пожара в шахте применяют затопление пожарного участка, горизонта, а иногда и всей шахты. Изоляция участка в случае затопления водой производится водоупорными перемычками, рассчитанными на максимально возможное давление воды. Эти перемычки должны иметь трубы с манометрами для контроля за давлением воды на перемычку в период затопления и спуска воды.

Обычно затопление является крайней мерой и не всегда может гарантировать ликвидацию пожара. Недостатком тушения пожаров способом затопления является остановка горных работ на длительный срок. Требуется дополнительные средства на от-

качку воды, восстановление нарушений. Низкая эффективность затопления происходит оттого, что вода не всегда достигает разогретых областей (очаг может быть выше уровня воды, могут образовываться полости, заполненные воздухом, в которых сохраняется очаг пожара). Если очаг находится в завале, то фильтрация воды через скопление угля и пород минимальна из-за высокого гидравлического сопротивления и ее может быть недостаточно для охлаждения очага, который в таком состоянии способен сохраняться сотни суток. Известны случаи, когда воду из пожарного участка откачивали через несколько лет после затопления и горение возобновлялось.

### **6.11. Контроль за эндогенными пожарами, их списание и вскрытие пожарного участка**

Оценку состояния эндогенного пожара выполняют по изменению температуры, влагосодержания и газового состава атмосферы в изолированном пространстве пожарного участка, а также по результатам приповерхностного замера состава газов. Контроль ведется силами шахты и ВГСЧ путем осмотра перемычек, отбора проб и замера температуры, влагосодержания, количества и перепада давления воздуха через воздуховыдающие контрольные скважины и трубки в перемычках.

В первые двое суток после изоляции пожарного участка отбор проб осуществляет ВГСЧ не реже чем через каждые 6 ч. В последующие 15 сут отбор проб происходит через сутки. После стабилизации атмосферы замеры ведут с периодичностью 2 раза в месяц. Результаты замеров состава атмосферы заносят в «Книгу наблюдений за пожарным участком...».

Признаками потушенного пожара считается отсутствие или снижение до фоновых значений содержания в воздухе изолированного пространства и в приповерхностном слое почвы водорода и окиси углерода, а также уменьшение температуры воды и воздуха до 25 °С. Списание пожара в категорию потушенных производится при получении трехкратного подтверждения отсутствия признаков пожара в пробах, отобранных последовательно через 24 ч во всех контрольных точках шахты, и положительных результатов приповерхностной съемки, выполненной в указан-

ный период. При необходимости получения дополнительных данных производится разведка пожарных участков силами ВГСЧ.

Для списания пожара создается комиссия, которая рассматривает:

- акт расследования аварии;
- проект тушения пожара;
- результаты анализа проб воздуха и замеров температуры;
- акт обследования горных выработок и состояния поверхности;
- донесение ОВГСО о разведке пожарного участка;
- данные измерения температуры и состава воздуха по контрольным точкам (в том числе в приповерхностном слое почвы);
- расчет полного экономического ущерба от пожара.

Списание пожара оформляется актом.

Вскрытие пожарного участка разрешается не ранее чем через 0,5 месяца после списания пожара в категорию потушенных. В этот период за ним ведется наблюдение как за действующим пожаром. Вскрытие пожарных участков осуществляет ВГСЧ по мероприятиям, разработанным главным инженером шахты и командиром ОВГСО. Ремонтно-восстановительные работы на участке с потушенным пожаром разрешены не ранее чем через сутки после вскрытия. При обнаружении в исходящей струе оксида углерода, водорода, радона и этилена выше фонового значения для данного участка проветривание прекращают и закрывают проемы в перемычках.

## 7. ПЛАН ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙ НА ШАХТАХ

С целью быстрой и эффективной ликвидации аварий, в том числе и пожаров, на каждой шахте составляется *план ликвидации аварий (ПЛА)*, в котором изложены меры и действия, направленные на спасение людей при возникшей аварийной ситуации и ее ликвидацию. ПЛА состоит из оперативной части, содержащей мероприятия по установлению необходимых вентиляционных режимов, указания о путях выхода людей с аварийного участка и путях движения горноспасательных частей к местам нахождения людей и очагов аварии, графического материала и

указаний распределения обязанностей между лицами, участвующими в ликвидации аварии.

Графический материал содержит:

- 1 – вентиляционный план;
- 2 – план горных работ с обозначением на нем подземных водопроводов и воздухопроводов с пожарными кранами, мест переключения воздухопроводов на подачу воды, мест хранения огнетушителей, мест нахождения насосов и водосборников с указанием их производительности, мест расположения складов с аварийными материалами и оборудованием, противопожарных поездов, арок, перемычек, противопожарных дверей, мест установки телефонов;
- 3 – план поверхности шахты с расположением шурфов и подъездных путей к ним, скважин, провалов, водоемов, резервуаров, насосов, водопроводов, гидрантов, пожарных кранов, поверхностных складов аварийных материалов и оборудования;
- 4 – схему электроснабжения шахты;
- 5 – планы околоствольных дворов с указанием мест расположения вентиляционных и противопожарных устройств и трубопроводов.

План ликвидации аварий составляется главным инженером шахты на каждое полугодие и согласовывается с командиром ВГСЧ. Каждому месту возможной аварии присваивается определенный номер (позиция), который наносится на план горных работ или схему вентиляции. Номера располагаются в возрастающем порядке по направлению движения струи свежего воздуха. Одна позиция может относиться к одной или нескольким горным выработкам, если для спасения людей в этих выработках необходим одинаковый вентиляционный режим и если пути выхода людей и мероприятия по их спасению одинаковы. ПЛА находится у главного инженера шахты и в ВГСЧ. Начальникам участков даются выписки из плана, относящиеся к их участкам, с путями выхода людей на поверхность или к сборным пунктам.

При пожарах в шахте должен предусматриваться вывод людей со всех участков, куда могут поступать продукты горения при нормальном проветривании и при реверсивном режиме. В случае пожара в шахтах, опасных по газу и пыли, а также при

взрывах газа и угольной пыли все люди должны выводиться из шахты на поверхность.

## 8. ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЕ ДЕЛО

Большое количество опасных факторов, действующих на людей на горных предприятиях, требует соблюдения повышенных мер безопасности. В условиях возникновения аварийных ситуаций обстановка значительно осложняется из-за ограниченного пространства, опасности обрушения кровли, выделения горючих газов и пыли. Нередко рудничная атмосфера становится непригодной для дыхания из-за снижения концентрации кислорода, выделения токсичных газов, на пути движения возникают завалы, резко снижается видимость вследствие дыма, образующегося при горении и взрывах. Для проведения мероприятий по спасению пострадавших и ликвидации аварийной ситуации необходимо специальное оборудование и специалисты, подготовленные для работы в сложных условиях. Согласно правилам безопасности РФ, все шахты должны обслуживаться *военизированными горноспасательными частями (ВГСЧ)*. Персонал ВГСЧ освобожден от работ, не связанных с горноспасательным делом.

Основные функции горноспасательного дела заключаются в организации горноспасательных формирований в горнодобывающих регионах страны, разработке научных основ борьбы с рудничными авариями, а также создании технических средств для спасения людей и ликвидации возникших аварий. Одним из направлений деятельности горноспасательных формирований является разработка мер по предупреждению возможных и ликвидации возникших аварий на горных предприятиях. Горноспасательные подразделения обслуживают действующие, строящиеся и ликвидируемые угольные и сланцевые шахты, разрезы, обоганительные и брикетные фабрики независимо от форм собственности.

Горноспасательные формирования – это военизированные подразделения, являющиеся государственными специализированными организациями. Военизированные горноспасательные части угольной промышленности (ВГСЧ) возглавляются Центральным штабом (ЦШ ВГСЧ). В структуру ВГСЧ входят опера-

тивные подразделения и вспомогательные службы. Оперативными подразделениями являются отдельные военизированные горноспасательные отряды (ОВГСО), отдельные взводы (ОВГСВ), взводы (ВГСВ), пункты (ВГСП), реанимационно-противошоковые службы (РПГ) и группы воздушно-депресссионных съемок (ДГС). Во вспомогательные службы входят газоаналитические лаборатории (ГАЛ), цеха и мастерские по производству и ремонту горноспасательного оборудования, научные подразделения, заводы и др. Горноспасательные части комплектуются из рабочих основных подземных специальностей и инженерно-технических работников шахт и рудников, прошедших специальную подготовку по горноспасательному делу.

Для выполнения горноспасательных работ в начальной стадии аварии, до прибытия ВГСЧ, на каждой шахте организуется **вспомогательная горноспасательная служба (ВГС)**. Для комплектования этой службы привлекаются опытные горнорабочие подземных специальностей, горные мастера и другие лица надзора, годные по состоянию здоровья к работе в газозащитных респираторах, к физическим и психологическим перегрузкам в экстремальных ситуациях и прошедшие соответствующее обучение. Члены ВГС должны уметь оказывать помощь пострадавшим, тушить пожары, применять имеющиеся на рабочем месте средства ликвидации аварий, оценивать опасные факторы аварийной обстановки, хорошо знать пути выхода из возможных аварийных зон.

Расстановка членов ВГС по рабочим сменам и местам работы в шахте предусматривается в плане ликвидации аварии (ПЛА) и должна обеспечить прибытие к месту аварии со стороны свежей струи воздуха не менее двух человек с респираторами и другим оснащением через 30 мин с момента получения задания. Руководство действиями членов ВГС в зоне аварии до прибытия ВГСЧ осуществляет старшее должностное лицо технического надзора шахты или участка. При отсутствии на аварийном участке инженерно-технических работников члены ВГС действуют самостоятельно в соответствии с планом ПЛА и в зависимости от сложившейся обстановки.

Члены ВГС, узнав об аварии в нерабочее время, должны прибыть на предприятие в распоряжение руководителя ВГС. Ру-

ководитель ВГС действует по указанию ответственного руководителя аварии, а по прибытии ВГСЧ – по указанию руководителя горноспасательных работ. Члены ВГС могут привлекаться для выполнения работ вместе с ВГСЧ в загазированных выработках по доставке материалов, управлению шахтными механизмами, демонтажу оборудования, возведению изолирующих сооружений и др. При этом в формируемом отделении из пяти человек должно быть не более двух членов ВГС.

**Задачи горноспасательной службы.** Главными задачами военизированных горноспасательных частей являются:

- выполнение экстренных и неотложных мер по спасению и эвакуации застигнутых аварией людей и оказание пострадавшим медицинской помощи;

- локализация и ликвидация аварий, в том числе тушение подземных пожаров и ликвидация последствий взрывов метана и угольной пыли, внезапных выбросов угля и газа, загазований, обрушений и затоплений (водой, глинистой пульпой и др.) горных выработок;

- осуществление на обслуживаемых объектах профилактического контроля за готовностью предприятия к ликвидации аварий и выполнение технических работ (разгазований горных выработок и др.) неаварийного характера, требующих защиты органов дыхания и применения специального снаряжения;

- участие в работах, вытекающих из задач системы предупреждения и действий в чрезвычайных ситуациях. Виды таких работ определяются Свидетельством на право выполнения аварийно-спасательных и других неотложных работ в чрезвычайных ситуациях.

**Организация аварийно-спасательных работ.** Ответственным руководителем по ликвидации аварии является главный инженер шахты или лицо, его замещающее. До прибытия ответственного руководителя его функции выполняет горный диспетчер шахты, который несет ответственность за осуществление мероприятий, предусмотренных планом ликвидации аварий (ПЛА). В первоначальный момент ликвидации аварии руководителем горноспасательных работ является командир обслуживающего шахту горноспасательного взвода или его помощник по оперативно-технической работе.

Прибывший на шахту командир горноспасательного отряда или его заместитель по оперативно-технической работе после ознакомления с аварийной обстановкой принимает решение о руководстве горноспасательными работами, сделав запись в оперативном журнале ВГСЧ. Решения ответственного руководителя ликвидации аварии и руководителя горноспасательных работ, направленные на спасение людей и ликвидацию аварии, являются обязательными для всех лиц и организаций, участвующих в ликвидации аварийной ситуации. В случае разногласия между ответственным руководителем ликвидации аварии и руководителем горноспасательных работ, обязательным к выполнению является решение ответственного руководителя ликвидации аварии, если оно не противоречит требованиям Устава ВГСЧ.

Если мероприятия ПЛА выполнены и не дали положительных результатов или при их реализации ясно, что принимаемых мер недостаточно, а также при изменении аварийной обстановки ответственный руководитель ликвидации аварий и руководитель горноспасательных работ обязаны обеспечить разработку оперативного плана ликвидации аварии. После его реализации или изменения ситуации составляется оперативный план № 2 и т. д. до окончания аварийно-спасательных работ, в котором предусматриваются способы, средства и силы ВГСЧ и шахты для борьбы с аварией, а также аварийная обстановка, прогноз развития пожара, меры безопасности, исполнители и сроки выполнения работ.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков, Л. Н. Рудничные пожары / Л. Н. Быков. – М. : Углетехиздат, 1963. – 160 с.
2. Скочинский, А. А. Рудничные пожары / А. А. Скочинский, В. М. Огиевский. – М. : Углетехиздат, 1954. – 387 с.
3. Соболев, Г. Г. Горноспасательное дело / Г. Г. Соболев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1979. – 432 с.
4. Козлюк, А. И. Противопожарная защита угольных шахт. – Киев : Техника, 1980. – 156 с.

5. Глузберг, Е. И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. – М. : Недра, 1986. – 161 с.
6. Игишев, В. Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. – М. : Недра, 1987. – 176 с.
7. Кондратьев, А. И. Охрана труда в строительстве : учеб. для эконом. специальностей строит. вузов / А. И. Кондратьев, Н. М. Местечкина. – М. : Высш. шк., 1990. – 352 с.
8. Правила пожарной безопасности в РФ : ПБ 01-03 ; утв. приказом МЧС России от 18.06.2003 № 313.
9. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие для вузов / под ред. проф. Л. А. Муравья. – М. : ЮНИТИ–ДАНА, 2004. – 431 с.
10. Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах / В. А. Горбатов, В. Г. Игишев, В. Б. Попов [и др.]. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2002. – 177 с.
11. СНиП 21-01-97. Правила безопасности зданий и сооружений. Нормы проектирования / Госстрой России. – М. : ГУП ЦПП, 2001.
12. Защита угольных шахт от самовозгорания угля / В. А. Горбатов, В. Г. Игишев, В. Б. Попов [и др.]. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2001. – 132 с.
13. Портола, В. А. Локация очагов подземных пожаров с поверхности : монография / под ред. В. А. Колмакова ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2001. – 176 с.
14. Линденау, Н. И. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров / Н. И. Линденау, В. М. Маевская, В. Ф. Крылов. – М. : Недра, 1977. – 319 с.
15. Самовозгорания промышленных материалов / В. С. Веселовский, Н. Д. Алексеева, Л. Н. Виноградова [и др.]. – М. : Наука, 1964. – 246 с.
16. Прогноз и профилактика эндогенных пожаров / В. С. Веселовский, Л. Н. Виноградова, Г. Н. Орлеанская [и др.]. – М. : Наука, 1975. – 159 с.
17. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело : учеб. для вузов / К. З. Ушаков, Н. О. Каледина, Б. Ф. Кирин [и др.]. – М. : Изд-во МГГУ, 2002. – 487 с.

Портола Вячеслав Алексеевич

Пожарная безопасность горных предприятий

Учебное пособие

Редактор О. А. Вейс

Подписано в печать 06.10.2008. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 300 экз. Заказ

ГУ КузГТУ, 650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ КузГТУ, 650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.