

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ  
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**

**О.Е. СТОРОНКИНА**

**Т.А. МОЧАЛОВА**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ  
И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**

**Учебное пособие**

Иваново 2020

УДК 544 + 614

**Т.А. Мочалова, О.Е. Сторонкина**

Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учебное пособие. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – 145 с.

В учебном пособии рассмотрены процессы, приводящие к возникновению и распространению горения, параметры и особенности открытых и внутренних пожаров, а также условия прекращения горения и огнетушащие средства. Приведены особенности горения газов и паров горючих жидкостей, горения жидкостей, твердых веществ и материалов.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по специальности 40.05.03 «Судебная экспертиза», а также может быть использовано при проведении пожарно-технической экспертизы.

*Издается по решению Редакционно-издательского совета  
Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России  
(Протокол № 3 от 27.05.2020)*

*Рецензенты:*

*Профессор кафедры пожарной тактики  
и основ аварийно-спасательных и других неотложных работ  
(в составе УНК «Пожаротушение»), доктор технических наук  
подполковник внутренней службы*

*Д.В. Тараканов*

*Заведующая кафедрой органической и физической химии  
ФГБОУ ВО Ивановский государственный университет  
доктор химических наук, профессор*

*Т.П. Кустова*

## Содержание

Введение	4
Глава 1. Общие сведения о пожарах	5
Раздел 1.1. Пожар как комплекс физических и химических процессов и явлений. Основные понятия и определения	5
Раздел 1.2. Процессы теплопереноса на пожаре	13
Раздел 1.3. Особенности горения твердых веществ и материалов	25
Глава 2. Открытые пожары	34
Раздел 2.1. Газовых и газонефтяных пожаров	34
Раздел 2.2. Пожары резервуаров	41
Раздел 2.3. Открытые пожары твердых горючих материалов	50
Раздел 2.4. Лесные и степные пожары	56
Раздел 2.5. Развитие пожаров лесоскладов, торфяников	62
Глава 3. Внутренние пожары	67
Раздел 3.1. Параметры внутренних пожаров	67
Раздел 3.2. Основные процессы и явления на внутренних пожарах	74
Раздел 3.3. Параметры теплообмена на внутреннем пожаре	79
Раздел 3.4. Параметры газообмена на внутреннем пожаре	85
Раздел 3.5. Газообмен внутреннего пожара	91
Глава 4. Прекращение горения на пожаре	101
Раздел 4.1. Предельные параметры процессов горения, их роль и значение в обеспечении пожарной безопасности	101
Раздел 4.2. Огнетушащие средства. Вода	112
Раздел 4.3. Огнетушащие средства, Пены	117
Раздел 4.4. Огнетушащие средства. Порошки.	123
Раздел 4.5. Огнетушащие средства. Аэрозоли. Хладоны	130
Раздел 4.6. Огнетушащие средства. Инертные газы	138
Список литературы	144

## ВВЕДЕНИЕ

Для понимания особенностей физико-химических процессов, протекающих на пожаре, важно знать, что горение веществ и материалов на том или ином объекте пожара, является основным признаком этого пожара. Начало пожара - это возникновение горения в очаге, которое возможно только при наличии трех условий: горючего вещества, источника зажигания и окислителя.

Для установления причины пожара необходимо собрать полную информацию обо всех его составляющих, включая помимо самого источника зажигания, данные о воспламенившемся материале и условиях взаимодействия горючего материала и источника зажигания. Полученные сведения позволят объяснить, каким образом в каждом конкретном случае оказалось возможным возникновение горения в результате взаимодействия источника зажигания и горючего материала.

Выделить из множества условий причину пожара очень непросто. Версии о причине пожара выдвигаются, исследуются, подтверждаются или отклоняются в зависимости от особенностей развития пожара, вида и мощности источников зажигания, скорости распространения горения, от особенностей физических явлений, сопровождающих горение, от времени возникновения горения и т.д.

В большинстве случаев, для установления причины пожара необходимо установление места возникновения пожара. С установлением места возникновения пожара тесно связаны вопросы о путях распространения огня, о времени развития скрытого пожара, о связи нескольких мест возникновения пожара между собой, о времени прогорания или обрушения конструкций, о температурном режиме пожара, о зависимости площади пожара от времени и т.д.

Поэтому для проведения качественной пожарно-технической экспертизы необходимо знание дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров».

## ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЖАРАХ

### РАЗДЕЛ 1.1. ПОЖАР КАК КОМПЛЕКС ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

#### 1.1.1 Основные процессы, протекающие на пожаре

Согласно Федерального закону от 21 декабря 1994 г. N 69-ФЗ «О пожарной безопасности» *пожар* – неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства [1].

В реальных условиях пожара процесс горения диффузионный, т.е. скорость химической реакции зависит от скорости притока воздуха из окружающей среды, а также от скорости удаления образующихся газообразных продуктов. Данный процесс называется *газообменом*. По характеру газообмена пожары делятся на *открытые* и *внутренние*. Первые протекают на открытом пространстве, вторые – в помещениях.

На *открытых пожарах*, приток воздуха в зону химических реакций зависит от газодинамического режима образования горючей смеси. Если поток горючего газа или пара поступающий в зону горения, ламинарный, то соотношение горючего и окислителя в смеси будет определяться законами диффузии. Если поток турбулентный, то наряду с диффузией происходит механическое перемешивание реагирующих компонентов. Отвод продуктов горения из зоны реакции практически не ограничен. Скорость и направление распространения открытых пожаров зависят от размеров факела пламени, распределения горючих веществ, материалов или объектов, скорости и направления ветра.

На *внутренних пожарах* параметры горения и распространения пожара определяются: физико-химическими свойствами, количеством и характером распределения горючих материалов, соотношением вытяжных (в основном окна) и приточных (двери) проемов помещения, высотой и размерами очага.

В том случае если процесс горения не успел распространиться на все горючие предметы или материалы, находящиеся в помещении, то внутренний пожар - *локальный*. Если произошел полный охват всего помещения пламенем пожар уже считается *объемным*.

Из курса «Теория горения и взрыва» известно, что горение представляет собой химическую реакцию между горючим веществом и окислителем, протекающую с выделением тепла. Важная особенность горения - это его способность к пространственному распространению до максимально возможных размеров, определяемых условиями среды. Химические реакции, лежащие в основе этого процесса, являются причиной возникновения таких физических явлений, как диффузия, конвекция, теплопроводность и излучение.

Часть тепла, выделяющегося в зоне горения, расходуется в зоне химических реакций на нагрев продуктов горения, часть - передается в окружающую

среду, часть - идет на нагрев горючих материалов и поддержание горения. Данный процесс называется *теплообменом*.

*Теплопроводность* определяет время прогрева горючих материалов под действием теплового потока до температуры воспламенения и, следовательно, скорость распространения пожара. При установившемся горении теплопроводность определяет поведение строительных и ограждающих конструкций при пожаре.

*Конвективный теплообмен* присутствует на всех стадиях пожаров. Он обусловлен движением потоков нагретых газов, так как плотность газообразных продуктов горения значительно меньше плотности воздуха вследствие высокой температуры. Это вызывает подъемную силу, под действием которой они перемещаются вверх. На открытых пожарах конвективные потоки практически не влияют на распространение пламени на уровне земли. Характер их движения определяет условия образования смеси горючих газов с окислителем и параметры процесса горения. Через различные щели, технологические и вентиляционные отверстия, пустоты в стенах и перекрытиях потоки нагретых газов проникают в другие помещения, способствуя распространению пожара по зданию, затрудняют или делают невозможной эвакуацию людей.

*Излучение* - определяющий вид передачи тепла на пожаре, поскольку его действие может проявляться на больших расстояниях. При прохождении теплового потока через газовую среду он ослабляется в результате поглощения и рассеяния лучистой энергии. Например, атмосферный воздух, содержащий частицы пыли и влаги во взвешенном состоянии, а также промышленные думы имеют коэффициент ослабления  $0,2 \div 0,3$ .

Для поддержания горения на пожаре необходимо постоянное поступление свежего воздуха в зону химических реакций и удаление из нее образующихся продуктов. При пожарах на открытом пространстве происходит газообмен зоны химических реакций с окружающей средой, который лимитируется только диффузией окислителя. При пожарах в помещениях газообмен осуществляется через проемы в ограждающих конструкциях. И чем больше расход поступающего воздуха, тем более интенсивно протекает процесс горения, выше интенсивность тепловыделения и тем быстрее развивается пожар.

Таким образом, процессы горения, тепло- и газообмена являются взаимосвязанными. Следствия этих трех процессов определяют то, что называется *обстановкой на пожаре*. Так, интенсивность тепловыделения определяет возможность и скорость распространения пожара путем нагрева веществ и материалов до температуры воспламенения или самовоспламенения. Под действием тепловых потоков строительные конструкции теряют несущую способность, что приводит к их обрушению, травмированию и гибели людей, а также затрудняет ведение боевых действий. Этот параметр также определяет время достижения предельно допустимой температуры газовой среды на путях эвакуации людей –  $70^{\circ}\text{C}$ .

Газообмен влияет на интенсивность выделения тепла при сгорании горючего вещества, определяет состав газовой среды в помещении очага пожара, в смежных помещениях и на путях эвакуации людей. Газы, удаляемые из горящих

помещений, имеют высокую температуру, что приводит к предварительному подогреву горючих материалов и увеличению скорости распространения пожара. Кроме того, интенсивность поступления воздуха в помещение может быть недостаточной для полного сгорания газов, выделяемых горящим веществом. Тогда образование и воспламенение горючей смеси происходит также за пределами первоначального очага. В таких случаях новые очаги пожара могут возникать в самых неожиданных местах здания.

Таким образом, пожар представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных физико-химических процессов, таких как горение, газообмен и теплообмен.

### 1.1.2 Зоны пожара

Пространство, в котором происходят пожар и сопровождающие его явления, делится на три зоны: горения, теплового воздействия и задымления (табл. 1.1). Практически установить границы зон при пожаре не представляется возможным, так как происходит их непрерывное изменение, и можно говорить лишь об условном их расположении.

Таблица 1.1 Характеристика условных зон пожара

Зона пожара	Характеристика зоны пожара. Границы
<p><i>Зона горения</i> – это часть пространства, в которой происходит подготовка горючих веществ к горению и их горение.</p>	<p>Зона горения является теплогенератором на пожаре, т.к. именно здесь выделяется все тепло и развивается самая высокая температура.</p> <p>Зона горения включает в себя объём паров и газов пламени, ограничивается фронтом пламени и поверхностью горящих веществ, с которой пары и газы поступают в зону горения. При беспламенном горении (тлении) зона горения совпадает с поверхностью горения. Иногда зона горения ограничивается конструктивными элементами: стенами зданий, резервуаров.</p>
<p><i>Зона теплового воздействия</i> – это часть пространства, примыкающая к зоне горения, в котором тепловое воздействие приводит к заметному изменению состояния материалов и конструкций и делает невозможным пребывание людей без теплозащиты.</p>	<p>С течением времени происходит распространение зоны горения, следовательно, и границы зоны теплового воздействия расширяются. Тепло от фронта пламени распространяется за счёт излучения и конвекции. На внутренних пожарах зона теплового излучения меньше, чем на открытых, т.к. стены играют роль экранов, а дым обладает высокой поглощающей способностью и снижает интенсивность излучения.</p> <p>Ближней границей является зона горения, а дальнюю определяют либо по температуре, которая превышает 60-70°C, т.е. пребывание людей и выполнение боевых действий невозможно, либо по интенсивности теплового потока, где лучистое тепло, воздействуя на незащищенные</p>

	участки тела человека, вызывает болевое ощущение через короткий промежуток времени.
Зона задымления – это часть пространства, примыкающая к зоне горения и заполненная дымовыми газами, концентрация которых создаёт угрозу жизни и здоровью людей.	Зона задымления может включать в себя зону горения и зону теплового воздействия или их часть. Дым на открытых пожарах уходит выше зоны действия людей. Параметрами зоны задымления являются степень видимости, концентрация кислорода, температура дыма.

Угроза жизни и здоровью людей возникает при увеличении оптической плотности дыма до предельного значения и достижении предельно допустимой концентрации токсичных компонентов дыма. Оптическая плотность ( $D$ ) характеризует степень ослабления света при прохождении через слой дыма определенной толщины. Она определяется как отношение десятичного логарифма интенсивности лучей света в воздухе  $I_0$  к их интенсивности  $I_x$  после прохождения слоя дыма толщиной  $x$ :

$$D = \frac{\lg I_0}{I_x} \quad (1.1)$$

Как правило, при измерении  $D$  для характеристики плотности дыма принимают  $x=1$  м. Чем выше оптическая плотность, тем меньше расстояние, на котором человек видит сквозь слой дыма. Если объект освещается спереди (т.е. человек видит его в отраженном свете), то дальность его видимости в дыму  $L$  практически обратно пропорциональна оптической плотности  $D$  на м:

$$L = \frac{1}{D} \quad (1.2)$$

При освещении сзади, контур объекта виден на большем расстоянии:

$$L = \frac{2,5}{D} \quad (1.3)$$

Дым, выделяемый при пожаре, обычно имеет  $D \geq 10$ . Соответственно, видимость в таких условиях составит 10 – 25 см в зависимости от характера освещения. Если минимальная допустимая видимость на путях эвакуации людей  $L$  принимается 5 м, оптическая плотность (при  $x=1$  м) должна быть равна  $1/5 = 0,2$ . Соответственно, при допустимой видимости 20 м оптическая плотность дыма не должна превышать 0,05.

На открытых пожарах положение зоны задымления зависит от площади пожара и скорости ветра. При скорости ветра меньше 2 м/с дым уходит вверх, а при скорости ветра более 8 м/с – прижимается к земле, но интенсивно разбавляется воздухом. В обоих случаях дым практически не оказывает влияния на действия людей. Таким образом, на открытых пожарах зона задымления проявляется при скорости ветра от 2 до 8 м/с.

На внутренних пожарах дым является наиболее опасным фактором. Размеры зоны задымления в помещении (здании) зависят от условий распространения газовых потоков и газообмена очага пожара с внешней средой.



### 1.1.3 Основные параметры пожаров

Пожары всегда различны и индивидуальны, то есть разнообразны не только режимы горения (кинетическое и диффузионное, гомогенное и гетерогенное, ламинарное и турбулентное, дефлаграционное и детонационное), но и его условия (состояние и расположение горючих веществ, тепло- и массообмен и т.д.). Поэтому введены параметры пожаров, по которым исследуют, сравнивают, классифицируют пожары. К таким параметрам относятся:

*Продолжительность (время) пожара  $\tau_n$*  – время с момента возникновения горения до полного его прекращения, мин, ч.

*Время свободного развития пожара* – время с момента возникновения горения до начала подачи огнетушащего вещества в очаг пожара, мин, ч.

*Площадь пожара  $S_n$*  – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На практике, чаще, используют горизонтальную проекцию. Данный параметр является нормативным. Он служит для оценки обстановки на пожаре, расчета сил и средств, необходимых для его тушения. Однако при горении изделий и конструкций из твердых горючих материалов (ТГМ) площадь пожара, как правило, не соответствует физической площади горения.

*Площадь поверхности горения  $S_{пг}$*  – суммарная площадь всех горящих поверхностей, характеризует реальную, физическую площадь ТГМ, которая участвует в горении, т. е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме. Величина  $S_{пг}$  определяет количество образующихся газообразных продуктов и, соответственно, размеры зоны горения.

*Коэффициент поверхности горения  $K_{пг}$*  – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{пг} = \frac{S_{пг}}{S_n} \quad (1.4)$$

Из данного выражения следует, что площадь горения превышает площадь пожара в  $K_{пг}$  раз. Например, в современных квартирах значение  $K_{пг}$  составляет  $3 \div 5$ . Следовательно, если площадь пожара  $3 \text{ м}^2$ , то площадь горения и, соответственно площадь тушения, составляет  $9 \div 15 \text{ м}^2$ .

*Линейная скорость распространения пожара  $v_{л}$*  – путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени, м/мин. Фактически это скорость распространения зоны горения по площади объекта.

Если горючим веществом является жидкость, то скорость распространения пожара практически равна скорости распространения пламени по поверхности жидкости. В зависимости от соотношения начальной температуры жидкости  $T_0$  и температуры воспламенения ( $T_{всп}$ ) значение может изменяться в 10 раз. Так, если  $T_0 < T_{всп}$ , то  $v_{л}$  редко превышает 0,05 м/с. При  $T_0 > T_{всп}$  линейная скорость равна скорости распространения пламени по паровоздушным смесям – 0,5 м/с и более.

Если горючая нагрузка состоит из твердых горючих материалов, то  $v_{л}$  зависит от скорости распространения пламени по поверхности ТГМ и от скорости

его перехода с одного предмета на другой. Поэтому на  $v_{\text{л}}$  влияет также характер размещения горючих изделий и материалов на объекте, интенсивность теплового излучения, направление и скорость газовых потоков. При распределенной пожарной нагрузке интенсивности излучения от горящего материала может быть недостаточно для воспламенения соседних предметов. Тогда пожар не распространится на всю площадь объекта и останется локальным.

Величина  $v_{\text{л}}$  зависит также от состава газовой среды, поступающей в зону горения. На внутренних пожарах, по мере развития процесса горения, концентрация кислорода в газовой среде уменьшается, а поэтому температура пламени и его излучательная способность снижаются. Это приводит к уменьшению скорости распространения пламени по поверхности горючего. Вместе с тем, температура газовой среды в помещениях часто достигает температуры воспламенения материалов до того, как пожар охватит все помещение. В этих случаях перед фронтом пламени образуется газоздушная смесь на нижнем концентрационном пределе, по которой пламя распространяется со скоростью до 50 м/с. Это явление называется *общей вспышкой*.

Таким образом, линейная скорость распространения пожара зависит от очень многих факторов, прогнозировать которые чрезвычайно сложно. Поэтому при пожарно-технических расчетах используют усредненные значения  $v_{\text{л}}$ , полученные в результате анализа параметров пожаров на различных объектах.

*Массовая скорость выгорания абсолютная*  $v_{\text{м}}^{\text{абс}}$  – масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени.

*Удельная массовая скорость выгорания*  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара:

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = \frac{v_{\text{м}}^{\text{абс}}}{S_{\text{п}}} \quad (1.5)$$

*Приведенная массовая скорость выгорания*  $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = \frac{v_{\text{м}}^{\text{абс}}}{S_{\text{пг}}} \quad (1.6)$$

*Теплота пожара*  $q_{\text{п}}$ , кВт, – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени:

$$q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}}^{\text{абс}} Q_{\text{н}} \quad (1.7)$$

где

$Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг;

$\beta$  – коэффициент полноты сгорания (0,75 – 0,9).

*Температура пожара.* Температурой внутреннего пожара считается среднеобъемная температура газовой среды в помещении, температурой открытого пожара – максимальная температура пламени.

*Коэффициент избытка воздуха* на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха  $G_{\text{в}}^{\text{ф}}$  к требуемому  $G_{\text{в}}^0$ :

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}^0}{G_{\text{в}}^{\text{ф}}} \quad (1.8)$$

*Требуемый расход воздуха*  $G_B^0$ , кг/с, – необходимый для полного сгорания материала с данной массовой скоростью.

*Фактический расход воздуха*  $G_B^{\phi}$ , кг/с, – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени.

Параметры пожаров в помещениях сильно зависят от свойств, количества и характера размещения горючих веществ и материалов.

Суммарная масса горючих веществ и материалов, приходящихся на  $1\text{ м}^2$  площади их размещения  $S$ , называется *удельной горючей нагрузкой*  $p_{ГН}$ , кг/м<sup>2</sup>, и определяется по формуле:

$$p_{ГН} = \frac{\sum m_i}{S} \quad (1.9)$$

где

$m_i$  – масса  $i$ -го горючего материала, кг;

$S$  – площадь размещения горючего материала, м<sup>2</sup>.

*Площадью размещения* называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если участки в помещении, на которых находятся горючие вещества и материалы, не разделены преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых больше требуемых, площадь размещения равна площади пола.

Все горючие вещества и материалы, находящиеся на объекте, являются потенциальными источниками энергии, которые при пожаре выделяют тепло. Поэтому при характеристике степени пожарной опасности объектов используется *удельная пожарная нагрузка*  $g_{ПН}$ , МДж/м<sup>2</sup>, – количество тепла, выделяемое горючей нагрузкой при полном сгорании:

$$g_{ПН} = \frac{\sum m_i Q_{Hi}}{S} \quad (1.10)$$

где

$Q_{Hi}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего вещества или материала, кДж/кг;

$m_i$  – масса  $i$ -го горючего материала, кг;

$S$  – площадь размещения горючего материала, м<sup>2</sup>.

Различают постоянную и временную пожарную нагрузку. К постоянной пожарной нагрузке относятся сгораемые элементы строительных конструкций здания и стационарно установленного оборудования. К временной нагрузке относят складированные горючие материалы, сырье, полуфабрикаты, мебель и т.п. Пожарная нагрузка всего помещения определяется как сумма постоянной и временной нагрузки.

### Вопросы для самоконтроля:

1. По какому признаку пожары делятся на открытые и внутренние?
2. Назовите основные отличительные особенности процесса горения на открытых и внутренних пожарах.
3. В чем заключается отличие «треугольника пожара» от «треугольника горения»?

4. Какие виды теплообмена присутствуют на пожаре?
5. Каково соотношение различных видов теплообмена на открытых и внутренних пожарах?
6. Дайте характеристику зонам пожара.
7. В чем заключается отличие площади пожара от площади горения?
8. Дайте определение массовой скорости выгорания абсолютной, удельной и приведенной.
9. В чем заключается отличие удельной горючей от удельной пожарной нагрузки?

## РАЗДЕЛ 1.2. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА ПОЖАРЕ

Развитие любого пожара во времени невозможно спрогнозировать без знания закономерностей теплообмена. Существует три основных вида теплопередачи, отличающихся своим механизмом: теплопроводность, конвекция, излучение.

Во время пожара одновременно присутствуют все три вида передачи тепла. Однако на той или иной стадии развития пожара или на каком-либо участке преобладает один из них.

### 1.2.1 Перенос теплоты теплопроводностью

*Теплопроводность* – это передача тепла между непосредственно соприкасающимися макрочастицами тела, имеющими разную температуру. Она определяет интенсивность тепловых потоков в твердых материалах, играя важную роль в процессах их воспламенения и распространения пламени с их участием. При теплопроводности тепло распространяется в любом направлении в сторону меньшей температуры. Теплопроводность более всего характерна твердым телам, менее – жидкостям, ещё менее – газам. Это объясняется расстоянием между частицами (молекулами, ионами) различных агрегатных состояний. Теплопроводность определяет время прогрева твердых веществ до момента воспламенения и является важным параметром в решении задач огнестойкости строительных конструкций и ограждений. Например, пожары на судах распространяются в соседние помещения обычно теплопроводностью через стальные перегородки и перекрытия.

#### Температурное поле

Все виды распространения тепла могут происходить только в том случае, если между телами или в различных точках тела температура не одинакова. Процесс распространения тепла неразрывно связан с распределением температуры. Поэтому, необходимо установить понятия *температурного поля* и *температурного градиента*.

Температура, как известно, является параметром состояния тела и характеризует степень его нагретости.

Совокупность мгновенных значений температуры, во всех точках пространства характеризуемых координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и временем  $\tau$  называется *температурным полем*.

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (1.11)$$

Это выражение является математическим выражением температурного поля. Различают *стационарное* и *нестационарное температурное поле*.

*Стационарное температурное поле* наблюдается в том случае, когда температура в различных точках пространства не изменяется во времени. Если же температура изменяется во времени, температурное поле называют *нестационарным*.

Как видно из основного уравнения температурного поля распространение тепла может идти по одной, двум и трём направлениям. В соответствии с этим различают одно, двух и трёхмерное поле.

### Температурный градиент

Если соединить точки тела, имеющих одинаковую температуру, то получим поверхность температур, называемую *изотермической*. А так как в одной и той же точке тела не может быть двух различных значений температур, то изотермические поверхности двух различных температур не могут пересекаться.

Рассмотрим близко расположенные друг к другу изотермические поверхности с температурами  $t$  и  $t+\Delta t$ . При перемещении точки вдоль изотермической поверхности с температурой  $t$  не будет изменения температуры. Перемещаясь вдоль направления  $x$ , пересекающего изотерму с температурой  $t+\Delta t$  будем наблюдать изменение температуры. При этом наиболее резкое изменение температуры на единицу длины будем наблюдать в направлении нормали  $n$  к изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$  называется *температурным градиентом*.

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.12)$$

Температурный градиент является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности из точки  $O$ . За положительное направление этого вектора принимается направление в сторону возрастания температуры. Физический смысл температурного градиента заключается в изменении температуры в градусах, приходящимся на 1 м расстояния между изотермическими поверхностями по нормали. Значение температурного градиента, взятое с обратным знаком, называется *падением температуры*.

Количество теплоты, которое проходит через изотермическую поверхность за единицу времени называется *тепловым потоком* ( $Q$ ). Единицей измерения является Ватт (Вт).

Тепловой поток, отнесённый к 1 м<sup>2</sup> изотермической поверхности, называется *плотностью теплового потока* ( $q$ ). Единицей измерения является Вт/м<sup>2</sup>.

Величины  $Q$ , а также  $q$  являются вектором, за положительное направление которого принимают направление по нормали к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры, т.е. противоположно направлению вектора температурного градиента.

### Закон Фурье

В 1822 г. французский учёный Фурье Жан Батист Жозеф выдвинул гипотезу, согласно которой тепловой поток, проходящий через тело пропорционален температурному градиенту, коэффициенту теплопроводности и площади изотермической поверхности. Вектор  $q$  нормален к изотермической поверхности и направлен в сторону убывания температуры, а вектор температурного градиента – направлен в сторону возрастания температуры, т.е. противоположно

но вектору  $q$ . Это обстоятельство учитывается знаком минус в формуле, который математически выглядит следующим образом:

$$Q = -\lambda grad t F \quad (1.13)$$

где

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,

$grad t$  – температурный градиент,

$F$  – площадь изотермической поверхности,  $m^2$ .

Если использовать не тепловой поток, а плотность теплового потока (т.е. если учесть, что  $q=Q/F$ ), то закон Фурье примет вид:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1.14)$$

Гипотеза Фурье многократно подтверждалась экспериментально и в настоящее время представляется как физический закон.

### Коэффициент теплопроводности

Величина  $\lambda$  является физической характеристикой вещества. *Коэффициент теплопроводности* – это тепловой поток в Ваттах, проходящий через тело на площади изотермической поверхности  $1 m^2$  при расстоянии между изотермическими поверхностями  $1 m$ , и разнице температур между ними  $1$  градус. Измеряется в  $Вт/(м \cdot К)$ . Он характеризует способность вещества проводить тепло.

Наибольший коэффициент теплопроводности имеют металлы (Ag - 418, Cu - 395, Au - 300, Al - 210, сталь - 47  $Вт/(м \cdot ^\circ C)$ ). Коэффициент теплопроводности строительных материалов находится в пределах 0.23-2.9, теплоизоляционных материалов 0,58 - 0,23, жидкостей - 0,093-0,7, газов - 0,0058 - 0,58  $Вт/(м \cdot ^\circ C)$ .

В общем случае коэффициент теплопроводности имеет различные значения для различных веществ. Для данного вещества коэффициент теплопроводности зависит:

- от вида материала;
- от температуры;
- от влажности, т.к.  $\lambda$  воды больше  $\lambda$  сухого воздуха, то влажные материалы будут иметь большие коэффициенты теплопроводности, чем сухие;
- от структуры материала;
- от направления теплового потока.

Задачи пожарной безопасности при изучении теплопроводности сводятся к нахождению необходимой толщины стены (трубы, теплоизоляции и т.д.) и нахождению температуры на необогреваемой стороне стены.

Кроме того в непосредственном контакте с нагревательными устройствами могут находиться легковоспламеняемые и горючие материалы. Для оценки возможности возгорания этих материалов (газов и т.д.) необходимо знать температуру поверхности наружной части нагревательного устройства.

## 1.2.2 Перенос тепла конвекцией

*Конвективный теплообмен* – совместный процесс конвекции и теплопроводности, т.к. при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры.

Конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твердого тела называют конвективной теплоотдачей, которая часто сопровождается теплоотдачей излучением.

К основным факторам, определяющим количество тепла, передаваемого в конвективном теплообмене, относятся:

1. причины возникновения движения жидкости;
2. режим движения жидкости;
3. физические свойства жидкости;
4. форма и размеры поверхности, участвующей в конвективном теплообмене;
5. направление теплового потока.

### Причины возникновения движения жидкости

В зависимости от причины, вызывающей движение жидкости, различают два рода движения: *свободное* (естественная конвекция) и *вынужденное* (вынужденная конвекция).

Свободное движение возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости (газа), что вызывает появление подъемной силы. Частицы жидкости, соприкасающиеся с нагретой поверхностью тела, нагреваются и становятся легче находящихся над ними холодных частиц. Вследствие этого холодные частицы стремятся опуститься и вытеснить более легкие нагретые частицы, которые должны совершить восходящее движение навстречу опускающимся холодным частицам. Возникает сложное беспорядочное движение, в котором сталкиваются восходящие и нисходящие потоки. Чем больше передается тепла, тем интенсивнее свободное движение жидкости. Количество передаваемого тепла пропорционально поверхности тела и разности температур теплоотдающей (или тепловоспринимающей) поверхности и жидкости.

Опыт показывает, что большое влияние на интенсивность естественной конвекции оказывает не форма теплоотдающей поверхности, а ее ориентация. Например, теплоотдающая поверхность горизонтальной плиты обращена кверху, то нагретая жидкость поднимается, не встречая препятствий. Если же теплоотдающая поверхность обращена книзу, то плита является препятствием для развития свободного движения, и теплообмен происходит менее интенсивно.

Вынужденное движение возникает под влиянием силового воздействия на жидкость извне — насосом, ветром, вентилятором, компрессором, эжектором и др. В этом случае устанавливается разность давлений жидкости на входе и выходе из канала, по которому движется жидкость (газ). Движущая сила этого движения определяется перепадом давлений. Интенсивность теплообмена при вынужденном движении жидкости зависит от: её скорости движения, рода и физических свойств жидкости, ее температуры, формы и размеров канала, в ко-



тором происходит теплообмен. В общем случае наряду с вынужденным движением жидкости имеет место свободное движение. Однако при значительных скоростях жидкости влияние свободного движения на теплообмен обычно не учитывают.

### **Режим движения жидкости**

Английский физик Осборн Рейнольдс в 1884 году в своих опытах установил, что при движении жидкости встречаются два вида потока, подчиняющихся различным законам: *ламинарный* и *турбулентный*.

При *ламинарном* движении отдельные слои жидкости перемещаются параллельно друг другу, не перемешиваясь; при *турбулентном*, наоборот, частицы жидкости хаотически перемещаются в различных направлениях, в том числе перпендикулярно основному потоку, что приводит к интенсивному перемешиванию жидкости.

Однако полностью развитый турбулентный режим наступает при значительно больших числах  $Re$  (примерно при  $10^4$ ); в диапазоне  $2200 < Re < 10^4$  имеет место *переходная* область движения.

### **Физические свойства жидкости**

В жидкостях (газах) в зависимости от их физических свойств процесс теплообмена протекает различно. На процесс теплообмена влияют следующие физические параметры жидкости:

- коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ),
- теплоемкость ( $C_p$ ),
- плотность ( $\rho$ ),
- коэффициент температуропроводности ( $a_\tau$ ),
- вязкость ( $\nu$ ).

Эти физические параметры для каждой жидкости имеют свои определенные значения и зависят, как правило, от температуры, а некоторые из них и от давления.

Чем больше значение коэффициента температуропроводности, тем меньше разность температур в отдельных точках тела при одинаковых условиях нагревания или охлаждения и тем равномернее нагревается или охлаждается тело.

В общем случае коэффициент температуропроводности характеризует теплоинерционные свойства вещества.

Вязкостью называется сила внутреннего трения, возникающая между частицами или слоями жидкости, движущимися с различными скоростями. Согласно закону Ньютона эта сила, отнесенная к единице поверхности, пропорциональна изменению скорости в направлении, перпендикулярном движению.

### **Форма и размеры теплообменивающейся поверхности**

Существенное влияние на плотность теплового потока в конвективном теплообмене оказывают форма и размеры теплообменивающейся поверхности.

Так, при движении жидкости в прямой гладкой трубе при числах Рейнольдса, меньших критического, теплообмен обусловлен ламинарным режимом движения жидкости. Если же труба имеет изгибы, сужения или расширения, т.е. турбулирующие факторы, то теплообмен при той же скорости движения становится более интенсивным. Интенсивность теплообмена зависит также от того, движется ли жидкость внутри замкнутого пространства или поверхность тела со всех сторон омывается жидкостью.

### Направление теплового потока

Интенсивность конвективного теплообмена зависит от того, в каком направлении передается тепло: от жидкости к стенке или, наоборот, от стенки к жидкости. Опытные данные показывают, что теплообмен от стенки к жидкости идёт интенсивнее.

Для удобства практических расчетов Ньютоном введена формула, по которой определяется плотность теплового потока в конвективном теплообмене:

$$q = \alpha(t_w - t_f) \quad (1.15)$$

где

$t_w$  – температура стенки, °С,

$t_f$  – температура жидкости, °С,

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, характеризующий условия теплообмена между жидкостью и стенкой, (Вт/м<sup>2</sup>).

Эта формула действует, если тепловой поток идёт от стенки к жидкости, т.е.  $t_w > t_f$ . Если же тепловой поток идёт от жидкости к стенке ( $t_w < t_f$ ), тогда используется следующая формула:

$$q = \alpha(t_f - t_w) \quad (1.16)$$

Представленные уравнения носят название *уравнение Ньютона – Рихмана*.

В отличие от коэффициента теплопроводности *коэффициент теплопередачи* не является постоянной величиной для данного материала, а зависит от геометрии и ориентации поверхности горючего материала, плотности и вязкости движущейся среды, скорости и характера ее потока.

Конвекционные потоки дымовых газов при пожарах в зданиях через различные щели, технологические и вентиляционные отверстия, пустоты в стенах и перекрытиях могут проникать в соседние помещения, способствуя быстрому распространению пожара по зданию, затрудняя или делая невозможным эвакуацию людей.

Определение коэффициента для различных условий является одной из главных задач теории теплообмена. Условия однозначности состоят из: *геометрических условий*, характеризующих форму и размеры тела или системы, в которой протекает процесс; *физических условий*, характеризующих физические свойства жидкости; *граничных условий*, характеризующих особенности протекания процесса на границе соприкосновения жидкости с поверхностью твердого тела; *временных условий*, характеризующих особенности протекания процесса во времени. Условия однозначности могут быть заданы в виде числовых зна-

чений величин, в виде аналитических зависимостей определяющих функций от соответствующих независимых переменных или же в виде дифференциального уравнения.

Особенности конвективного теплообмена необходимо учитывать при решении некоторых задач пожарной безопасности при внутренних пожарах:

– при внутренних пожарах возникают настолько мощные конвективные потоки, что их движение определяет направления распространения огня и продуктов горения. Это обстоятельство учитывается как при устройстве противопожарных преград и дымовых люков, так и в процессе тушения пожара пожарными подразделениями;

– конвективный перенос тепла при внутренних пожарах происходит таким образом, что зона наиболее высоких температур располагается на расстоянии 10–25 см от потолка помещения. Это обстоятельство учитывают при устройстве систем автоматической пожарной сигнализации и автоматических установок пожаротушения;

– при развившихся внутренних пожарах конвективные потоки оказываются такими мощными, что деформируют распыленные водяные и пенные струи, подаваемые оросителями стационарных установок пожаротушения. Особенно заметно влияние конвективных потоков в помещениях высотой 8–10 м и более, поэтому в таких случаях при проектировании стационарных установок пожаротушения увеличивают интенсивность подачи огнетушащего средства.

### 1.2.3 Теплоперенос излучением

*Лучистый теплообмен* – передача тепла, обусловленная превращением внутренней энергии вещества в энергию излучения, распространением электромагнитных волн и поглощением излучения веществом. Этот вид теплопереноса способствует развитию пожара в открытых очагах и его распространению на удаленные от очага пожара предметы и объекты.

Лучеиспускание свойственно всем телам, и каждое из них излучает и поглощает энергию непрерывно, если температура его не равна 0 К. При одинаковых или различных температурах между телами, расположенными как угодно в пространстве, существует непрерывный лучистый теплообмен.

При температурном равновесии тел количество отдаваемой лучистой энергии будет равно количеству поглощаемой лучистой энергии.

Количество энергии интегрального излучения, исходящего с поверхности излучающего тела  $F$  в единицу времени, называется *лучистым потоком*  $Q$ .

Лучистый поток, исходящий с единицы поверхности излучающего тела по всем направлениям полупространства (полусферы), называется *плотностью полусферического излучения*  $E$ :

$$E = \frac{dQ}{dF} \quad (1.17)$$

где

$dQ$  – элементарный лучистый поток, испускаемый элементом поверхности  $dF$ .

### Баланс лучистого теплообмена

Рассмотрим тепловой поток  $Q$ , падающий на тело (рис. 1.1). При попадании на тело часть лучистой энергии поглощается  $Q_A$ , преобразуясь во внутреннюю энергию тела, часть отражается от его поверхности  $Q_R$  и частично может проходить сквозь тело  $Q_D$ . Т.о.  $Q=Q_A+Q_R+Q_D$

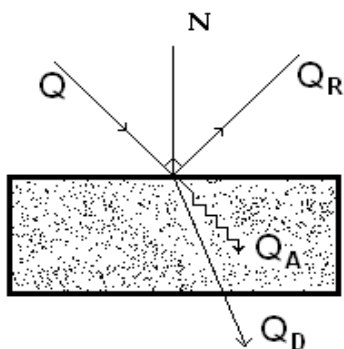
Отношение количества теплоты, поглощённой телом, к общему количеству теплоты, падающей на тело  $Q_A/Q=A$ , называется *поглощающей способностью тела*.

Отношение количества теплоты, отражённой телом, к общему количеству теплоты, падающей на тело,  $Q_R/Q=R$ , называется *отражающей способностью* тела.

Отношение количества теплоты, прошедшей сквозь тело, к общему количеству теплоты, падающей на тело,  $Q_D/Q=D$ , называется *отражающей способностью* тела.

Исходя из вышесказанного, можно записать:

$$A+R+D=1$$



**Рис. 1.1.** Схема распределения лучистой энергии, падающей на тело

Тела, полностью поглощающие всю падающую энергию, отвечающие условию  $A=1, R=D=0$ , называются *абсолютно чёрными телами*.

Тела, полностью отражающие всю падающую энергию, отвечающие условию  $R=1, A=D=0$ , называются *абсолютно белыми, или зеркальными телами*.

Тела, полностью пропускающие всю падающую энергию, отвечающие условию  $D=1, R=A=0$ , называются *абсолютно прозрачными, или диатермичными*.

В природе не существует ни абсолютно чёрных, ни абсолютно белых, ни диатермичных тел. Однако, по своим свойствам те или иные тела приближаются к абсолютно чёрным, абсолютно белым или диатермичным телам.

Например, по отношению к тепловому излучению не слишком нагретых тел снег является почти абсолютно чёрным телом. Он не поглощает лишь световые волны. Его поглощательная способность равна 0,985. Ближе к нему подходят сажа, бархат, иней ( $A=0,97$ ).

К свойствам зеркальных тел приближаются полированные листы металла ( $R=0,97$ ).

К свойствам диатермичных тел приближаются одно- и двухатомные газы, а также тонкие слои сухого воздуха ( $D\approx 1$ ).

Все реальные тела называются серыми телами.

Хотя в природе абсолютно черных, белых и прозрачных тел не встречается, тем не менее, понятие о них является очень важным для сравнения с реальными поверхностями. Кварц для тепловых лучей непрозрачен, а для световых и ультрафиолетовых лучей прозрачен. Каменная соль прозрачна для тепловых лучей и непрозрачна для ультрафиолетовых лучей. Оконное стекло прозрачно для световых лучей, а для ультрафиолетовых и тепловых почти непрозрачно. Белая поверхность (ткань, краска) хорошо отражает лишь видимые лучи, а тепловые лучи поглощает также хорошо, как и темная. Таким образом, свойство тел поглощать или отражать тепловые лучи зависят в основном от состояния поверхности, а не от ее цвета.

### Законы лучистого теплообмена

Законы лучистого теплообмена были получены для абсолютно черного тела в условиях стационарного режима.

*Закон Стефана – Больцмана* устанавливает взаимосвязь между излучательной способностью и температурой абсолютно черного тела:

$$E_0 = \sigma T^4 = C_0(T/100)^4 \quad (1.18)$$

где

$E_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;

$C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;

$T$  – абсолютная температура излучающего тела, К.

Для серых тел этот закон выглядит:

$$E = C(T/100)^4 \quad (1.19)$$

где

$E$  – излучательная способность серого тела, Вт/м<sup>2</sup>;

$C$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Если разделить энергию излучения серого тела на энергию излучения абсолютно чёрного тела, получим:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{C(T/100)^4}{C_0(T/100)^4} = \frac{C}{C_0} = \varepsilon \quad (1.20)$$

где

$\varepsilon$  – степень черноты тела.

Если принять, что  $C = C_0 \cdot \varepsilon$ , то энергию излучения серого тела можно записать как:

$$E = \varepsilon C_0(T/100)^4$$

Степень черноты может варьироваться от 0 до 1. Эта величина зависит не только от физических свойств тела, но и от состояния ее поверхности (шероховатости).

*Закон Кирхгофа* гласит, что отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для поверхностей всех серых тел

(при одинаковой температуре) и равно излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0 \quad (1.21)$$

где

$E$  и  $A$  – излучательная и поглощательная способности тел.

Из закона Кирхгофа вытекают три следствия:

- в природе не существует таких поверхностей, которые излучали бы больше энергии, чем абсолютно черное тело (при одинаковой температуре);
- тела с большей поглощательной способностью обладают большей плотностью излучения, и наоборот;
- поглощательные способности и степени черноты реальных (серых) тел численно равны ( $A = \varepsilon$ ).

Закон Ламберта устанавливает зависимость между количеством излучаемой энергии и направлением излучения:

$$E_\varphi = E_n \cos\varphi \quad (1.22)$$

где

$E_\varphi$  – количество энергии, излучаемой в направлении  $\varphi$ ,

$E_n$  – количество энергии, излучаемой в направлении нормали.

Закон Ламберта получен для абсолютно черного тела, для серых тел с шероховатой поверхностью этот закон справедлив при  $\varphi < 60^\circ$ .

Для полированных поверхностей закон Ламберта неприменим, для них лучеиспускание при угле будет большим, чем в направлении, нормальном к поверхности.

Закон Вина утверждает, что максимум интенсивности излучения соответствует следующему значению длины волны:

$$\lambda_{max} = \frac{2.9}{T \cdot 10^3} \quad (1.23)$$

Из формулы видно, что максимум излучения с повышением температуры смещается в сторону коротких волн (иначе закон Вина называют законом смещения).

Закон Планка выражает зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела  $E_{0\lambda}$  от абсолютной температуры  $T$  и длины излучаемой волны  $\lambda$ .

Абсолютно черное тело при данной температуре испускает лучи всех длин волн от  $\lambda=0$  до  $\lambda=\infty$ . Если каким-либо образом отделить лучи с разными длинами волн друг от друга и измерить энергию каждого луча, то окажется, что распределение энергии вдоль спектра различно.

По мере увеличения длины волны энергия лучей возрастает, при некоторой длине волны достигает максимума, затем убывает. Кроме того, для луча одной и той же длины волны энергия его увеличивается с возрастанием температуры тела, испускающего лучи. Планк установил закон изменения интенсивности излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры и длины волны:

$$I_{s,\lambda} = c_1 \lambda^{-5} / (e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1) \quad (1.24)$$

где

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/м}^2;$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К};$$

$\lambda$  – длина волны, м;

$T$  – температура излучающего тела, К.

Для любой температуры интенсивность излучения  $I_{s\lambda}$  возрастает от нуля (при  $\lambda=0$ ) до своего наибольшего значения, а затем убывает до нуля (при  $\lambda=\infty$ ). При повышении температуры интенсивность излучения для каждой длины волны возрастает.

Падающий лучистый тепловой поток зависит от расстояния между факелом пламени и объектом, с которым связаны безопасные условия для облучаемого объекта. Эти условия могут быть соблюдены в случае, если между излучаемой и облучаемой поверхностями такое расстояние, при котором интенсивность облучения объекта или температура на его поверхности не превышает допустимых значений для данного объекта в течение определенного времени, по истечении, которого необходимо обеспечить его защиту.

Пожары внутри зданий характеризуются, как правило, излучением в основном нагретых продуктов сгорания, которые сравнительно быстро заполняют объем помещения и настолько изолируют пламя, что его излучение практически не оказывает влияния на нагревание окружающих тел.

На открытых пожарах мы имеем излучение факела в неограниченном объеме, так как конвективные тепловые потоки уходят вверх и почти не влияют на зону теплового воздействия на поверхности земли. К тому же, излучение факела представляет опасность также для жизни и здоровья людей и в значительной степени затрудняет действия пожарных подразделений, участвующих в тушении пожара.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие основные виды теплопереноса проявляются на пожаре?
2. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
3. Какие параметры вещества объединяет коэффициент температуропроводности?
4. Какой параметр характеризует скорость нарастания поверхностной температуры вещества? Как он рассчитывается?
5. От чего зависит коэффициент теплопередачи при конвекции?
6. Как и за счет чего происходит перенос тепла в отсутствие промежуточных сред?
7. Как связана суммарная энергия, излучаемая телом, с его температурой? Согласно какому закону можно ее определить?
8. Что понимают под степенью черноты тела (пламени)?

9. Назовите значение облученности, безопасное для личного состава пожарных подразделений при работе продолжительное время без специальных средств защиты.



## РАЗДЕЛ 1.3. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

### 1.3.1 Горение древесины и других природных материалов

Твердые вещества и материалы – индивидуальные вещества и их смешанные композиции с температурой плавления или каплепадения больше 50°C, а также вещества, не имеющие температуру плавления (например, древесина, ткани и т.п.) [3].

В отличие от жидкостей твердые вещества могут гореть при любой ориентации, а термопластики ведут себя очень похоже на жидкости, они расплавляются и текут. Температура на поверхности горящих твердых веществ обычно достигает больших значений. Подавляющее большинство твердых материалов горят в диффузионном режиме. Превращение твердого вещества в продукты горения, в основном, протекает в газовой фазе, а скорость лимитируется скоростью диффузии продуктов разложения и смешивания их с воздухом. Поэтому процесс горения твердых горючих материалов (ТГМ) принципиально не отличается от горения газов или жидкостей, т.е. горение ТГМ – это гомогенный, диффузионный процесс, который сопровождается выделением большого количества тепла. Однако есть и отличия в процессе горения ТГМ. Процессы, сопровождающие нагревание ТГМ, сложны и многообразны. Для некоторых твердых веществ процесс газификации сопровождается плавлением. При этом плавление может протекать без разложения твердого вещества (парафин, стеарин, сера, металлы) или с разложением (каучук и пластмассы).

Характерным примером твердого горючего материала является древесина. Древесина состоит из отмерших растительных клеток и имеет пористое строение. В различных породах древесины поры могут занимать от 56 до 72% ее объема. Высокая пористость древесины обуславливает ее низкую теплопроводность и малый вес.

Химический состав древесины очень сложен: это комплекс органических веществ, в состав которых входит углерод (49,5%), кислород (44,1%), водород (6,3%) и азот (0,1%). Кроме органических веществ, древесина содержит минеральные соединения, которые при сгорании дают 0,2 – 1,7% золы. Наибольшее количество золы приходится на кору и листья. В золе из древесины сосны, ели и березы содержится свыше 40% солей кальция, более 20% солей калия и натрия и до 10% солей магния.

В среднем можно принять, что в древесине хвойных пород содержится 48 – 56% целлюлозы, 26 – 30% лигнина, 23 – 26% гемицеллюлоз (10 – 12% пентозанов и около 13% гексозанов); в то же время древесина лиственных пород содержит 46 – 48% целлюлозы, 19 – 28% лигнина, 26 – 35% гемицеллюлоз (23 – 29% пентозанов и 3 – 6% гексозанов).

Целлюлоза (клетчатка  $[C_6H_{10}O_5]_n$ ) – главный строительный материал растительного мира, образующий клеточные стенки деревьев и других высших растений. Структурная формула представлена на рис. 1.2.

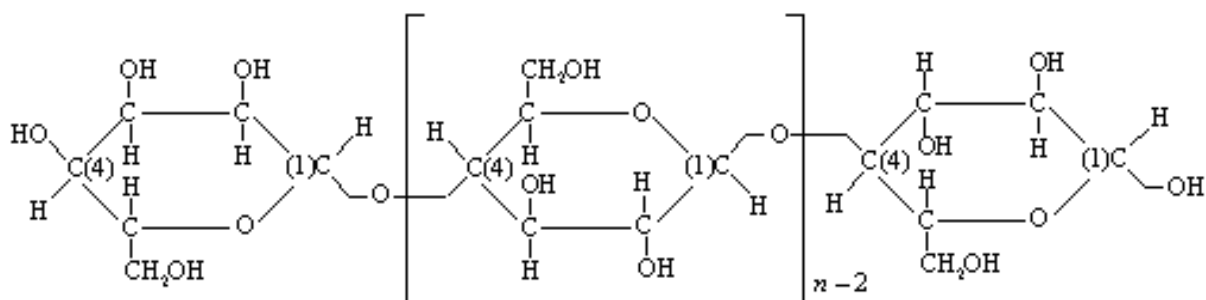


Рис. 1.2. Химическая структура целлюлозы

Рассмотрим поведение при нагревании древесины как наиболее распространенного горючего материала.

Горение древесины имеет существенное отличие от горения жидкостей и газов в том, что может протекать сразу в двух режимах – *гомогенном* и *гетерогенном*.

Поэтому при горении древесины можно выделить две фазы:

- 1) гомогенное (т.е. пламенное) горение газообразных продуктов разложения;
- 2) гетерогенное горение образовавшегося твердого углеродистого остатка.

Горению предшествует фаза нагрева поверхности, при которой начинается пиролиз – процесс разложение древесины при нагревании. При этом образуются газообразные и жидкие (в том числе древесная смола) продукты, а также твердый остаток – древесный уголь.

В основе пиролиза древесины лежат свободнорадикальные реакции термодеструкции гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина, протекающие соответственно при 200-260°C, 240-350°C и 250-400°C. Пиролиз древесины – экзотермический процесс, при котором выделяется большое количество теплоты (1150кДж/кг).

Если пиролиз протекает без доступа воздуха, то при повышении температуры до 170°C из древесины выделяется вода, при температуре от 170 до 270°C начинается разложение древесины и при 270–280°C происходит энергичное обугливание древесины с бурным выделением тепла. С 280 до 380°C идет главный период сухой перегонки с выделением жидких веществ – уксусной кислоты, метилового спирта, скипидара и легкой смолы. Перегонка практически заканчивается при температуре 430°C с образованием черного угля (примерно в количестве 19% от веса сухой древесины).

Газообразные продукты (неконденсирующиеся газы) при пиролитическом разложении древесины без доступа воздуха включают диоксид (45-55% по объему) и оксид (28-32%) углерода, водород (1-2%), метан (8-21%) и др. углеводороды (1,5-3,0%).

Но так как пламенное горение – это процесс, идущий только при доступе воздуха в зону горения, то и состав продуктов пиролиза в этом случае будет отличаться. В целом можно спрогнозировать обогащение зоны горения также и парами жидкофазных продуктов пиролиза, снижение содержания CO<sub>2</sub> за счет

разбавления зоны горения воздухом, а также наличие газообразных продуктов пиролиза в концентрациях между нижним и верхним концентрационным пределом воспламенения.

Стадия пламенного горения занимает достаточно короткий промежуток времени, но при этом выделяется около 55 – 60% всей энергии.

Скорость гетерогенного горения определяется скоростью поступления воздуха к поверхности. Часто гетерогенное горение называют *тлением*. Тление – это беспламенное горение волокнистых и пористых материалов, которые при нагревании образуют твердый углеродистый остаток. Это особый режим горения, когда образующиеся в результате пиролиза горючие газы не горят, а происходит только гетерогенное горение углеродистого остатка (поверхностное окисление). Тление может происходить и за счет кислорода воздуха, и за счет кислорода, содержащегося в порах и химической структуре материала.

К материалам, которые могут тлеть, относится широкий спектр материалов растительного происхождения (бумага, целлюлозные ткани, опилки), латексная резина, некоторые виды пластмасс (пенополиуретан, пенофенопласты). Материалы, которые могут плавиться или при разложении давать мало углеродистого остатка, не способны к тлению.

Природные материалы животного происхождения (шерсть, кожа, шелк) содержат белки, представляющие полимерные молекулы, мономерными единицами которых являются аминокислоты, объединенные пептидными связями. При их пиролизе образующиеся газы содержат аммиак, амины, следы цианистого водорода. Воспламеняемость этих материалов заметно ниже целлюлозных, однако необходимо принимать во внимание выделение ими при горении ядовитых и раздражающих газов.

### 1.3.2 Горение синтетических полимеров

Синтетические полимеры по поведению при нагревании можно разделить на две группы – *термопластичные* и *терморезистивные*. Отдельную группу составляют каучукоподобные эластомеры. *Терморезистивные* полимеры, имея сетчатую структуру, при нагревании не плавятся, а непосредственно разлагаются с образованием летучих веществ и углеродистого остатка. В отличие от них *термопласты* при повышении температуры размягчаются и плавятся с последующим разложением. Эта особенность влияет на динамику пожара.

При пиролизе полимеров можно выделить четыре основных механизма разложения: обрыв конечных звеньев полимерной цепи, случайную деструкцию цепи, обрыв ветвей цепи и сшивание макромолекул. В случае преобладания первого механизма в продуктах разложения велика молекулярная составляющая.

Распространение пожара может ускориться в результате падения капель и растекания горячей массы расплавленного полимера. Такое же поведение присуще эластичным пенополиуретанам. Нагрев и термическое разложение синтетических полимеров приводит к образованию, как простых молекул (водорода, этилена), так и веществ с большой молекулярной массой, которые летучи толь-

ко при высоких температурах. При пламенном горении большинство продуктов пиролиза окисляется в зоне пламени. При беспламенном горении и смешении продуктов пиролиза с холодным воздухом может происходить их конденсация с образованием аэрозолей.

Выход летучих веществ при термическом разложении полимеров с высокой степенью сетчатости значительно ниже, поскольку большая часть этих материалов при нагревании образует нелетучую обугленную массу.

Нагревание полимеров, макромолекулы которых при пиролизе сшиваются, приводит к их обугливанию, пример – фенолформальдегидные смолы. Такие полимеры за счет низкой интенсивности горения обладают желательными с противопожарной точки зрения свойствами. Состав летучих продуктов оказывает важное влияние на динамику пожара с участием твердых веществ. С одной стороны, химическая активность летучих веществ оказывает влияние на стабилизацию пламени, а с другой, их состав определяет количество образующихся в пламени сажистых частиц. Их содержание влияет на излучающую способность пламени и, следовательно, на величину теплового потока в сторону поверхности горючего материала. Влияет это и на интенсивность дымообразования при пожаре. Присутствие летучих веществ, содержащих молекулы ароматических углеводородов или стирола, обеспечивает коптящее пламя с высокой излучательной способностью.

Полиоксиметилен горит несветящимся пламенем, так как образующиеся при его нагреве вещества полностью состоят из формальдегида, который не производит копоти. В результате скорость горения этого материала низка. Таким образом, существует четкая зависимость между степенью черноты пламени и скоростью горения полимера. На интенсивность выделения тепла при горении большое влияние оказывает также полнота сгорания, которая для некоторых веществ может быть очень низкой. Так, для поливинилхлорида она менее 0.4. Исходя из химической природы органических соединений, полнота сгорания уменьшается в ряду алифатические > алифатическо-ароматические > ароматические > высокогалогенизированные вещества.

Следует помнить, что горение вертикальной поверхности термопластов не только приводит к стеканию горящего материала к основанию, но и сказывается на интенсивности ее горения. Взаимовлияние пламен от горизонтальной и вертикальной поверхностей неизбежно стимулирует пожар, создавая дополнительные проблемы, особенно в замкнутом пространстве, где горючие поверхности могут располагаться в непосредственной близости друг от друга. Это приводит к увеличению скорости горения и возрастанию площади пожара.

### **1.3.3 Горение металлов**

Горение металлов существенно отличается от горения других веществ. Оно контролируется не только кинетическими факторами или условиями диффузии окислителя, но и диффузией паров металла через оксидную пленку, образующуюся как при предпламенном окислении, так и в процессе горения. В зависимости от физико-химических свойств металла и оксидной пленки ряд ме-

таллов горят в паровой фазе (щелочные, щелочноземельные), другие испытывают поверхностное горение (цирконий, титан, бор), у третьих в зависимости от условий наблюдается горение либо в паровой фазе, либо на поверхности (алюминий, бериллий). Горение в паровой фазе более вероятно для летучих металлов.

Для парофазного горения летучих металлов (натрия, калия, лития, кальция, магния и др.) характерны высокая скорость реакции, наличие обособленной достаточно большой светящейся реакционной зоны и образование продуктов сгорания в виде сублимированного белого плотного дыма. Скорость процесса контролируется диффузией окислителя в зону реакции.

При поверхностном горении металлов реакция окисления протекает на межфазных границах оксид—газ и металл—оксид и контролируется диффузией металла и кислорода через оксид. Процессу свойственны высокая скорость и ограниченность светящейся зоны пределами межфазной поверхности. В случае горения порошков продуктами реакции являются частицы оксида примерно того же размера, что и исходный металл. Проявление того или иного механизма горения металла зависит также от температуры его кипения.

Защитное действие оксидной пленки различных металлов, оказывающей существенное влияние на процесс горения, наиболее отчетливо выражается объемным отношением  $\phi$ , показывающим, как изменяется объем металла при окислении, и представляющим собой отношение объема оксида к объему металла, из которого он получен. При  $\phi < 1$  оксид не может покрыть металл сплошной пленкой. Он имеет пористую структуру и не создает существенных препятствий дальнейшему окислению металла. К металлам, на которых образуется такая оксидная пленка, относятся литий, магний, кальций. При  $\phi > 1$  оксид покрывает металл сплошным слоем и служит эффективной преградой дальнейшему окислению. Такими оксидными пленками обладают алюминий, бериллий, никель, медь.

Другими свойствами, влияющими на защитные характеристики оксидной пленки и динамику развития горения металлов, являются ее механическая прочность и пластичность, адгезия пленки к металлу, растворимость оксида в расплавленном металле. В частности, титан и цирконий, несмотря на то, что их оксидная пленка сплошная и плотная, продолжают интенсивно окисляться, так как образующиеся оксиды растворимы в металлической фазе.

При рыхлых, либо растворимых в металле оксидных пленках скорость горения металла не зависит от их толщины и контролируется лишь скоростью диффузионных процессов в приповерхностном слое металла.

Существенное влияние на температуру воспламенения оказывает скорость нагрева металла, так как от этого параметра зависит толщина и плотность оксидной пленки. При большой скорости нагрева в пленке возникают деформации, вызванные разницей коэффициентов теплового расширения металла и оксида, которые приводят к появлению трещин и снижению величины адгезии пленки. В результате при значительной скорости нагрева достигается возгорание металлов, не воспламеняющихся при медленном нагреве.

Остановимся на особенностях горения некоторых металлов. Алюминий

покрыт весьма плотным непроницаемым слоем оксида. В условиях, когда не удастся избежать его образования, воспламенение алюминия происходит только после разрушения защитной пленки. В результате этого горение частиц алюминия сопровождается выбросами паров, вспышками, некоторым дроблением частиц, образованием белого дыма, размер частиц которого менее 1 мкм. Горение протекает как на поверхности, так и в паровой фазе. Очень широк температурный диапазон воспламенения алюминия, определяемый условиями процесса и степенью дисперсности частиц, который составляет от 770 – 920 К. Температура воспламенения магния практически в любых условиях составляет 720 – 970 К. Из-за низкой температуры плавления оксида бора  $B_2O_3$  (720 К) бор воспламеняется уже при 740 – 840 К. Высокая химическая активность циркония и растворимость его оксидной пленки способствуют воспламенению этого металла при низких температурах: от комнатных до 720 К.

Белый дым при этом не образуется. Температуры горения металлов значительны. В кислороде они достигают 2800 – 3500°C, а в воздушной среде – на 100 – 600°C ниже. Важно представлять особенности горения металла при выборе огнетушащих средств с учетом его химической активности. Например, магний может гореть в атмосфере любого из следующих газов: водяного пара с образованием водорода, диоксида углерода с образованием монооксида углерода, азота с образованием  $Mg_3N_2$ , хлорода с образованием  $MgF_2$ ,  $MgFBr$ ,  $MgBr_2$  и углерода. Из этого перечня видно, что выбор огнетушащих средств для борьбы с горящим магнием ограничен. Подобно магнию в чистом диоксиде углерода и азоте может гореть титановая пыль. Среди щелочных металлов в чистом азоте может гореть только литий. Все щелочные металлы самовоспламеняются при контакте с водой. Последующее энергичное горение сопровождается образованием плотного белого дыма.

### 1.3.4 Горение пылей и порошков

При обработке твердых и волокнистых материалов (угля, древесины, хлопка, зерна, табака, сахара и т.п.) образуется пыль, которая по своим свойствам более пожароопасна, чем вещество, из которого она получена.

Пыли и порошки могут вести себя при пожаре как большинство компактных веществ, но могут проявлять еще два опасных в пожарном отношении режима горения: тление и взрывное горение. Способность к тлению проявляют не все дисперсии, а только те, которые отличаются пористой структурой и склонностью к обугливанию (древесные опилки, мука). в то же время для многих горючих веществ распыление в воздухе способствует резкому возрастанию скорости горения, приводя к взрыву (угольная пыль в шахтах, текстильная и зерновая пыль).

Горение пылевоздушных смесей характеризуется выгоранием отдельных частиц пыли в диффузионном режиме, при этом пространство между частицами остается сравнительно холодным.

*Пыль* – коллоидная система, состоящая из твердой дисперсной фазы и газообразной дисперсионной среды, т.е. представляет собой твердое вещество, диспергированное (тонко размельченное) в газообразной среде.

Дисперсная фаза может состоять из частиц одинаковой величины (монодисперсная система) или частиц разной величины (полидисперсная система). Все промышленные пыли полидисперсные. В зависимости от среднего размера частиц пыль может длительно находиться во взвешенном состоянии или сразу же оседать после кратковременного перехода во взвешенное состояние.

Дисперсная система, представляющая собой пыль, взвешенную в воздухе, называется *аэрозолем*. Осевшая пыль называется *аэрогелем*. Даже в осевшем состоянии каждая отдельная частица раздробленного вещества со всех сторон окружена газовой (воздушной) оболочкой.

Аэрозоли по своим свойствам занимают промежуточное положение между аэрогелем и гомогенной газовой смесью. Также как и аэрогели являются гетерогенными дисперсными системами с одинаковой твердой фазой, и поведение их определяется физико-химическими свойствами этой твердой фазы. С газовоздушными смесями аэрозоли сходны тем, что горение большинства из них протекает со взрывом, и характеризуются они многими параметрами, типичными для газовых смесей.

Из свойств пыли, определяющих их пожарную опасность, наиболее важными являются: дисперсность, химическая активность, адсорбционная способность, склонность к электризации.

Рассмотрим особенности горения аэрозоля и аэрогеля.

Основными параметрами, характеризующими пожарную опасность *аэрогеля*, являются температура воспламенения и самовоспламенения.

Температура самовоспламенения твердых веществ в измельченном состоянии гораздо ниже, чем в исходном компактном. Это обусловлено большей удельной площадью поверхности пыли по сравнению с веществом, из которого она получена. В таблице 1.3 показана температура самовоспламенения древесины ели в различном состоянии.

**Таблица 1.3 Температура самовоспламенения еловой древесины**

№ п/п	Вид материала	$T_{св}, ^\circ\text{C}$
1	Еловый брус	397
2	Еловые опилки	347
3	Древесная мука (аэрогель)	255

В целом горение пыли в осевшем состоянии во многом напоминает горение твердого горючего материала, из которого эта пыль получена. Отличительной особенностью аэрогеля является его *способность переходить во взвешенное состояние*. При нагревании протекают все подготовительные процессы, характерные для твердых горючих материалов, однако скорость их протекания выше, что объясняется развитой поверхностью, повышенной химической активностью, сниженной теплопроводностью материала в результате измельче-

ния, увеличенной адсорбционной способностью пыли. Это обуславливает меньший период индукции воспламенения, большую скорость распространения горения, а также повышенную склонность к самовозгоранию по сравнению с исходным материалом, из которого пыль получена.

Окислительные процессы протекают одновременно как на поверхности пылевого слоя, так и в его глубине. При этом в реакции принимает участие кислород, адсорбированный на поверхности материала. Скорость протекания процессов окисления под слоем горючей пыли на порядок ниже, чем на поверхности, в результате *горение в толще пылевого отложения может перейти в режим тления.*

Тлеющая пыль представляет большую опасность, поскольку:

1) выделяющиеся горючие продукты разложения могут накапливаться в закрытых объемах, и горение из диффузионного может перейти в кинетическое;

2) даже при слабом встряхивании (завихрении) тлеющая масса может самовоспламениться из-за резкого притока кислорода и вызвать взрыв взвешенной пыли.

*Аэрозоли* воспламеняются и горят аналогично газо-воздушным смесям. Поэтому их пожарная опасность характеризуется такими же параметрами, как и газо-воздушные смеси: КПП, минимальной энергией зажигания, максимальным давлением взрыва.

*Склонность аэрозолей к коагуляции* (слипанию) и осаждению существенно отличает их от газо-воздушных смесей. Это свойство обуславливает *более высокую энергию зажигания* (на два порядка выше), чем для газовых смесей.

Если распространение пламени в газовых смесях обусловлено прогревом холодной смеси за счет теплопроводности, то распространение пламени в пылевоздушных смесях происходит за счет прогрева холодной смеси излучением, испускаемым фронтом пламени.

Воспламенение и распространение пламени в аэрозоле происходит только в том случае, если концентрация находится в диапазоне концентрационных пределов воспламенения.

Наименьшая концентрация пыли в воздухе, при которой смесь способна воспламениться от источника зажигания с последующим распространением горения на весь объем смеси, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени.

Верхний концентрационный предел распространения пламени для пыли также существует, и может быть определен в лабораторных условиях, но на практике не используется. Это обусловлено тем, что постоянное существование концентраций аэрозоля выше верхнего предела, когда исключается воспламенение, невозможно и всегда будет существовать такой момент времени, когда в результате осаждения концентрация пыли окажется во взрывоопасном диапазоне.

В состоянии аэрозоля пыль может воспламеняться и гореть в кинетическом режиме, т.е. со взрывом, поэтому за основной параметр пожарной опасности принимается НКПП. В осевшем состоянии пыль может самовоспламениться



и самовозгораться, поэтому для оценки пожароопасных свойств аэрогеля используют температуру самовоспламенения ( $T_{св}$ ).

Пожарная опасность пылей металлов во многом зависит от химической активности вещества и степени его окисления. Так, порошок или стружка магния могут загореться при температуре источника  $500^{\circ}\text{C}$ , т. е. на  $150$  градусов ниже точки плавления. Смоченные растительными или животными жирами опилки этого металла способны самовоспламеняться. Порошок магния, смешанный с тефлоном ( $\text{C}_2\text{F}_4$ ), может гореть даже в атмосфере инертных газов, образуя  $\text{MgF}_2$  и углерод.

Порошок, свежие опилки и стружка алюминия тоже могут быть легко зажжены и способны гореть подобно магнию. Железные или стальные опилки на воздухе не горят, но могут воспламениться в чистом кислороде. Неокисленный железный порошок загорается спонтанно на воздухе. Для титановых стружек и тонких опилок источником зажигания может выступить зажженная спичка. Подобно магнию титановая пыль способна гореть даже в атмосфере азота и  $\text{CO}_2$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие факторы влияют на скорость распространения пламени по поверхности ТГМ?
2. Укажите физико-химические процессы при горении ТГМ.
3. Укажите основные процессы, приводящие к развитию пожара при горении термопластов.
4. От чего зависит выход углистых остатков при горении древесины?
5. Механизм воспламенения и горения металлов.
6. Чем отличается горение металлов от горения других твердых горючих веществ и материалов?
7. Существуют ли различия в горении летучих и нелетучих металлов? В чем они проявляются?
8. В чем проявляются особенности горения пылей?
9. В чем отличие горения аэрозоля от аэрогеля?

## ГЛАВА 2. ОТКРЫТЫЕ ПОЖАРЫ

### РАЗДЕЛ 2.1. ПОЖАРЫ ГАЗОВЫХ И ГАЗОНЕФТЯНЫХ ФОНТАНОВ

#### 2.1.1 Особенности открытых пожаров

*Открытые пожары* – это пожары, протекающее при отсутствии пространственных ограничений по тепло- и газообмену.

К открытым пожарам относятся пожары газовых и нефтяных фонтанов, пожары складов древесины, хлопка, караванов торфа и других твердых горючих веществ и материалов, пожары горючих жидкостей в резервуарах, сжиженных газов в газгольдерах, пожары на технологических установках, таких, как ректификационные колонны, сорбционные башни, технологические установки на объектах нефтяной, химической, нефтехимической, газовой промышленности, а также лесные и степные пожары, пожары на торфополях, открытых складах каменного угля, сланца и других горючих материалов. В открытые пожары могут перейти и обычные внутренние пожары в зданиях и сооружениях V степени огнестойкости.

Особенностью всех этих пожаров являются условия тепло- и газообмена. На этих пожарах не происходит «накопления» тепла в газовом пространстве зоны горения. Горение происходит в естественных условиях, не ограниченных строительными конструкциями. Теплообмен осуществляется с неограниченным окружающим пространством.

Так как газообмен на открытых пожарах не ограничен конструктивными элементами зданий и сооружений, поэтому он в большей степени зависит от внешних естественных газовых потоков, таких как интенсивность и направление ветра.

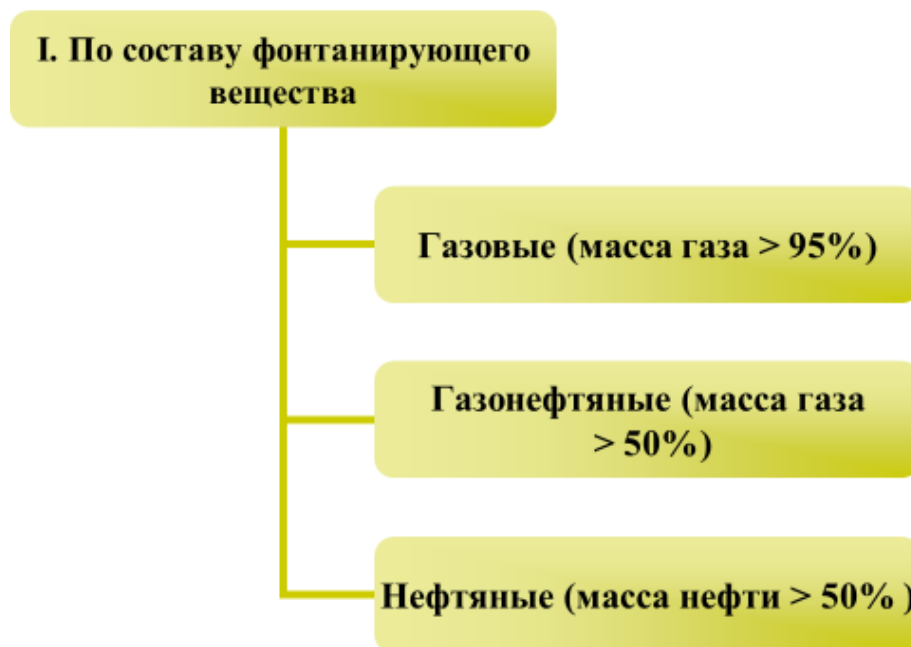
Зона горения на открытых пожарах определяется распределением горючих веществ в пространстве и формирующими ее конвективными газовыми потоками. Особенностью зоны теплового воздействия является то, что она определяется преимущественно лучистым тепловым потоком, так как конвективные тепловые потоки уходят вверх в неограниченное пространство и почти не влияют на зону теплового воздействия у поверхности земли, поэтому они чаще всего не препятствуют ведению боевых действий на пожаре. Мощные восходящие конвективные газовые потоки у основания очага горения создают разрежение. Например, у основания газового фонтана или горящего резервуара эти потоки создают столь интенсивный подвод свежего воздуха, что несколько снижают тепловое воздействие.

Соответственно изменяется и характер зоны задымления. За исключением горения торфа на больших площадях и леса в безветренную влажную (сырую) погоду, зона задымления, как правило, не создает затруднений по борьбе с открытыми пожарами, как на некоторых внутренних пожарах. Эти особенности открытых пожаров в значительной степени определяют и специфику методов борьбы с ними, особенности применяемых приемов и способов их тушения и характер боевых действий подразделений пожарной охраны.

## 2.1.2 Виды фонтанов

Фонтан представляет собой струю газа или жидкости, под давлением истекающую в окружающую среду. Фонтаны возникают в результате аварий при бурении и эксплуатации скважин на газовых и нефтяных месторождениях, при авариях в газовых хранилищах, локальном разрушении технологических трубопроводов. При появлении источника зажигания (механической искры, разряда статического электричества и т.д.) фонтан воспламеняется, возникает пожар. Наибольшая вероятность воспламенения у фонтана природного газа. Основным его компонентом является метан. По статистике в пожар переходит около 40% аварий на газовых и нефтяных месторождениях. Такие пожары отличаются большими масштабами, сложностью ликвидации, наносят огромный экономический и экологический ущерб.

Пожары фонтанов на месторождениях классифицируют по трем признакам: составу, по дебиту (мощности) и способу выброса (рис. 2.1, 2.2 и 2.3).



**Рис. 2.1.** Классификация фонтанов по составу фонтанирующего вещества

Состав фонтана можно определить по цвету пламени. Факел газового фонтана имеет цвет от светло-голубого до светло-желтого; газонефтяного – от светло-красного до темно-красного. Горение газонефтяного фонтана может сопровождаться клубами черного дыма. При пожарах нефтяных фонтанов во время истечения в воздухе успевает испариться и сгореть только незначительная часть нефти. Большая ее часть разливается и горит вокруг скважины. Пламя горячей струи нефти имеет темно-красный цвет и выделяет большое количество черного дыма.

## II. По мощности (дебиту)

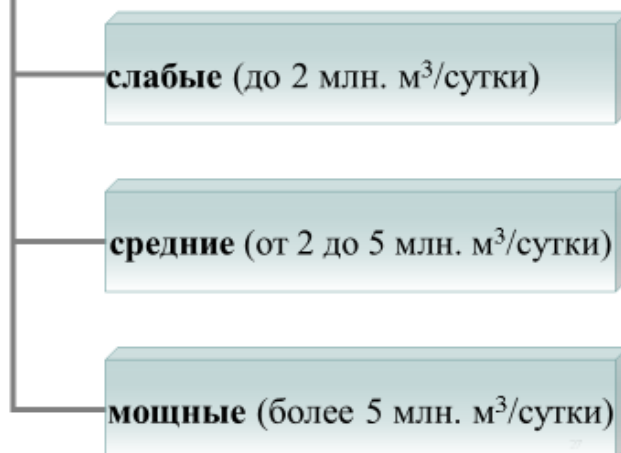


Рис. 2.2. Классификация фонтанов по дебиту (мощности)

Выброс горящего вещества может происходить в виде компактной или распыленной струи. Соответственно фонтан называется компактным или распыленным. При авариях на месторождениях газовые и газонефтяные фонтаны почти всегда являются распыленными т.к. на устье скважины находится арматура или оно загромождено остатками бурового оборудования. Кроме того, встречаются фонтаны комбинированные – с компактной струей и распыленной частью.

## III. По виду струи

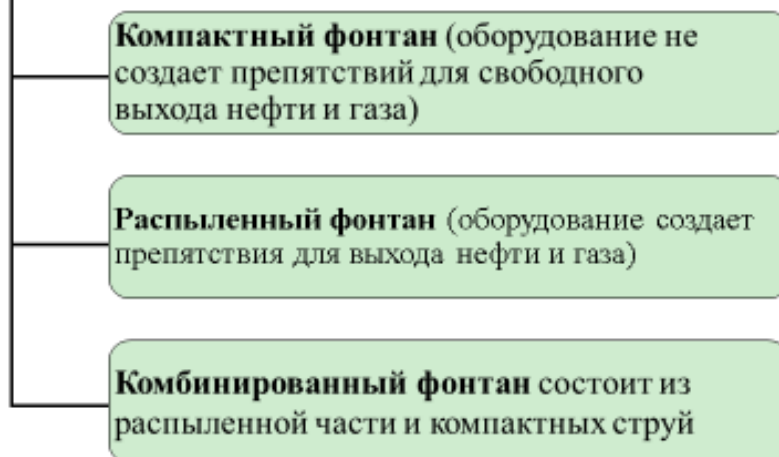


Рис. 2.3. Классификация фонтанов по способу выброса (виду струи)

При разработке газовых месторождений на рыхлых грунтах газ может пробиваться на поверхность, минуя скважину. Тогда, помимо основного факела, могут неожиданно образовываться фонтаны, бьющие прямо из земли – так называемые «грифоны».

Ликвидация мощных распыленных фонтанов представляет значительные трудности. Прежде чем, заглушить скважину на практике приходится выполнять очень большой объем подготовительных работ по растаскиванию поврежденной арматуры, удалению остатков устьевого оборудования и т.п. с тем, чтобы свести пожар к горению в компактном вертикальном факеле.

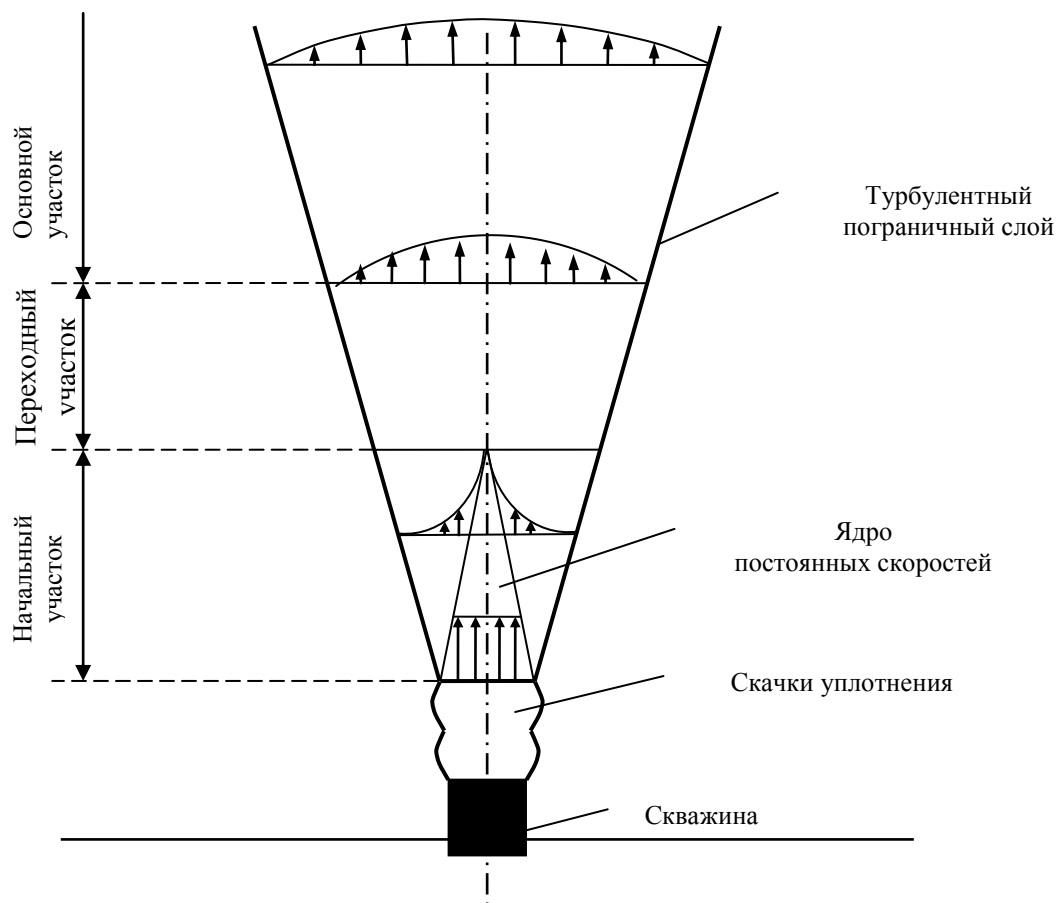
### 2.1.3 Характеристики горения газовых фонтанов

Горение факелов компактных газовых фонтанов является диффузионным. Скорость истечения газа из скважины зависит от отношения давления в пласте к давлению окружающей среды. Пластовое давление обычно в 2÷20 раз превышает атмосферное давление, поэтому скорость истечения газа на срезе сопла у подавляющего числа реальных газовых фонтанов больше скорости звука, число Рейнольдса при движении газового потока в атмосфере намного превышает критическое значение (2300) и пламя является турбулентным. В результате столь большого перепада давлений вблизи сопла формируется система волн расширения и сжатия газа – чередующихся скачков уплотнения. Благодаря им происходит постепенное выравнивание давлений газа и окружающей среды. Скорость потока газа быстро убывает по мере удаления от среза трубы. На некотором расстоянии от устья скважины характер течения в струе ничем не отличается от дозвуковой турбулентной струи. По характеру поля скоростей дозвуковая затопленная струя условно делится на три участка: начальный, переходный и основной (рис.2.4).

Начальный участок характеризуется наличием ядра постоянных скоростей. Газ, вытекающий из сопла, вовлекает в вихревое движение близлежащие слои воздуха. За счет турбулентного перемешивания на начальном участке образуется пограничный слой, в котором скорость перемещения газозвушной смеси вдоль оси струи меньше скорости в ядре. По мере удаления от среза трубы струя газа все больше разбавляется воздухом, ее поперечное сечение увеличивается, ядро постоянных скоростей сужается. На некотором расстоянии от среза трубы воздух достигает оси потока, ядро постоянных скоростей исчезает. Дальше струя газа перемешивается с воздухом по всему сечению.

На переходном участке струи происходит формирование поля скоростей газозвушной смеси. Его форма при этом переходит от конической к параболической и в дальнейшем не изменяется.

На основном участке скорость движения по сечению струи возрастает плавно от нуля в пограничном слое до максимума на оси потока.



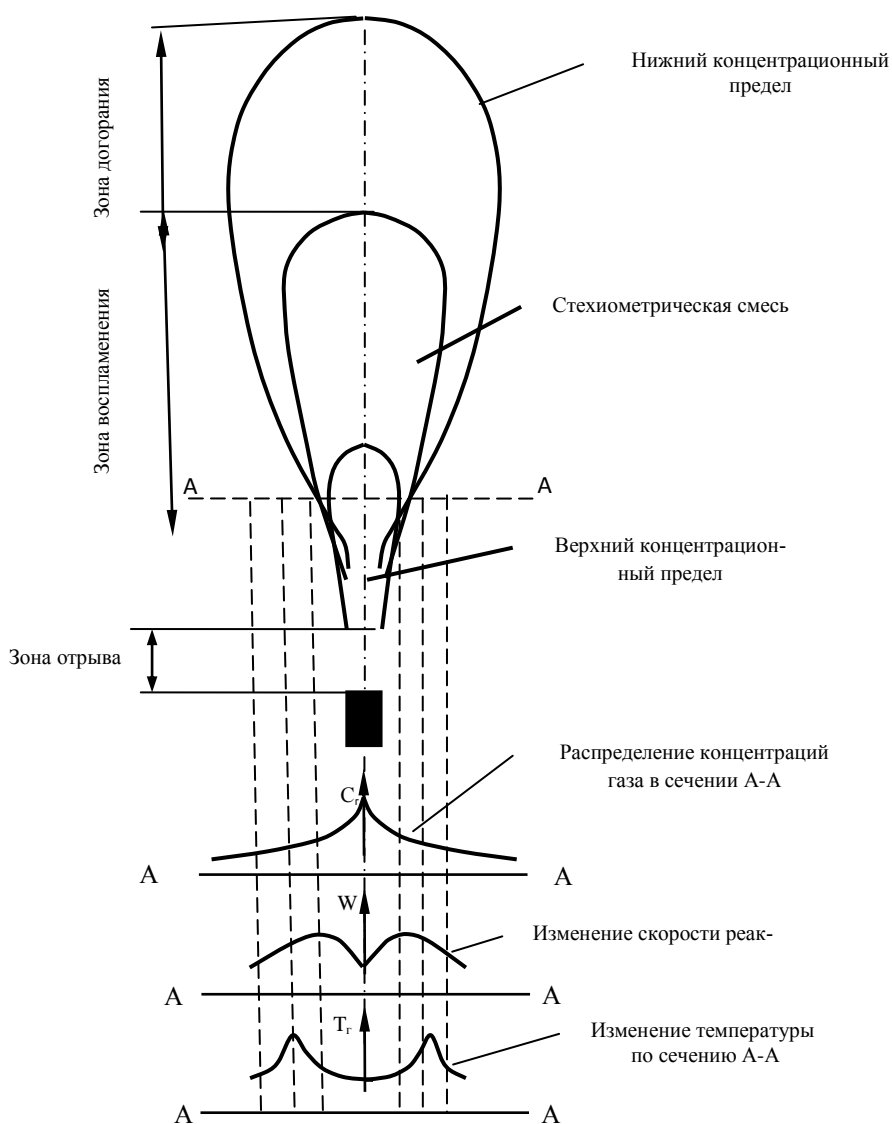
**Рис. 2.4.** Поле скоростей в струе газового фонтана

Из теории горения известно, что в движущемся потоке газа пламя стабилизируется, если линейная скорость потока  $V_{л}$  равна нормальной скорости распространения пламени  $U$ . Если  $V_{л} \leq U$  пламя соприкасается с устьем скважины. Проскок пламени внутрь трубы в данном случае возможен, только если по трубе движется смесь газа с окислителем, состав которой попадает в область воспламенения. Такая ситуация реализуется, например, при разгерметизации технологического аппарата, в котором обращается горючая газообразная смесь и сопровождается взрывом аппарата. Если  $V_{л} > U$  происходит срыв пламени и зажигание струи газа становится невозможным при любой концентрации горючего.

На реальных газовых фонтанах скорость потока в устье скважины намного больше турбулентной скорости распространения пламени. Однако в атмосфере она быстро гасится благодаря скачкам уплотнения. Расчет показывает, что на половине высоты факела скорость на оси потока составляет всего 20% от начальной. Горение начинается в той области, где уравниваются скорости потока горючего газа и распространения пламени. Поэтому нижняя кромка факела отрывается и висит на некотором расстоянии от устья скважины. Высота этой зоны отрыва пламени возрастает с увеличением расхода газа.

Подобно полю скоростей изменяется поле концентраций газа в струе. Известно, что горение возможно только в области концентраций, ограниченной

нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени. На участке сверхзвукового истечения пограничный слой не образуется, перемешивание газа с воздухом практически не происходит и концентрация газа по всему сечению струи равна 100%. По мере торможения потока концентрация воздуха в струе возрастает, а газа, наоборот, уменьшается. Таким образом, в поперечном сечении струи концентрация газа уменьшается от максимального значения на оси потока до нуля на его границе. В структуре факела газового фонтана можно выделить три характерных поверхности равных концентраций, соответствующих нижнему концентрационному пределу, стехиометрической смеси и верхнему концентрационному пределу (рис. 2.5).



**Рис. 2.5.** Структура факела газового фонтана

Реакция горения имеет с максимальную скорость на поверхности контура стехиометрических концентраций горючего. На этой же поверхности наблюдаются максимальные значения турбулентной скорости распространения и тем-

пературы пламени. Скорость реакции горения предельных смесей (при концентрации горючего газа равной нижнему или верхнему пределу) меньше, чем стехиометрических. Соответственно скорость распространения и температура пламени ниже (см. рис. 2.5). Таким образом, воспламенение турбулентной струи происходит по периферии потока в кольцевой области, где турбулентная скорость распространения пламени имеет максимальное значение.

По мере удаления от среза трубы зона максимальных температур сужается и на некотором расстоянии достигает оси потока. Этот участок факела от зоны отрыва до смыкания кольцевой области максимальных температур и скоростей распространения пламени называется зоной воспламенения (см. рис 2.5). Основной вклад в процесс образования горючей смеси и ее воспламенение здесь вносит турбулентное перемешивание газа и воздуха. Температура в этой зоне составляет порядка  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Выше зоны воспламенения находится зона догорания. Из-за высокой степени турбулизации потока смесь, образующаяся в зоне воспламенения, не является однородной и какая-то часть горючего не успевает прореагировать. Его догорание происходит в верхней части факела. В этой зоне процесс смешения осуществляется в основном за счет молекулярной диффузии. Температура факела в зоне догорания наибольшая т.к. здесь складывается действие лучистой и конвективной составляющей.

Максимальная температура факела зависит главным образом от состава газа. При горении фонтанов природного газа, которые содержат до 95% метана, максимальная температура в зоне догорания достигает примерно  $1350^{\circ}\text{C}$ . Наименьшая температура факела наблюдается в зоне отрыва. Средняя температура для этой зоны составляет около  $50^{\circ}\text{C}$ . Вокруг устья скважины существует небольшая зона низких температур. Однако выполнение каких-либо работ в этой зоне чрезвычайно затруднено. Уровень звукового давления здесь достигает 130 децибел (дБ), что превышает болевой порог для человека (110дБ).

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. По каким признакам классифицируются газовые фонтаны?
2. Чем характеризуются основные участки факела газового фонтана?
3. Опишите структура факела газового фонтана.
4. Что собой представляет поле концентраций газа в струе газового фонтана?
5. Назовите основные параметры пожара газового фонтана.
6. К каким последствиям приводит увеличение высоты факела газового фонтана?
7. Где наибольшая температура в факеле газового фонтана?



## РАЗДЕЛ 2.2. ПОЖАРЫ РЕЗЕРВУАРОВ

### 2.2.1 Возникновение и развитие пожара резервуара

Горение жидкости в резервуаре представляет собой горение паровоздушной смеси, образующейся над зеркалом горючей жидкости.

Возникновение пожара в резервуаре зависит от следующих факторов:

- наличия источника зажигания,
- свойств горючей жидкости,
- конструктивных особенностей резервуара,
- наличия взрывоопасных концентраций внутри и снаружи резервуара.

В большинстве случаев пожар внутри резервуара начинается со взрыва паровоздушной смеси. На образование взрывоопасных концентраций внутри резервуара существенное влияние оказывают:

- физико-химические свойства хранимых нефти и нефтепродуктов,
- технологические режимы эксплуатации,
- климатические и метеорологические условия.

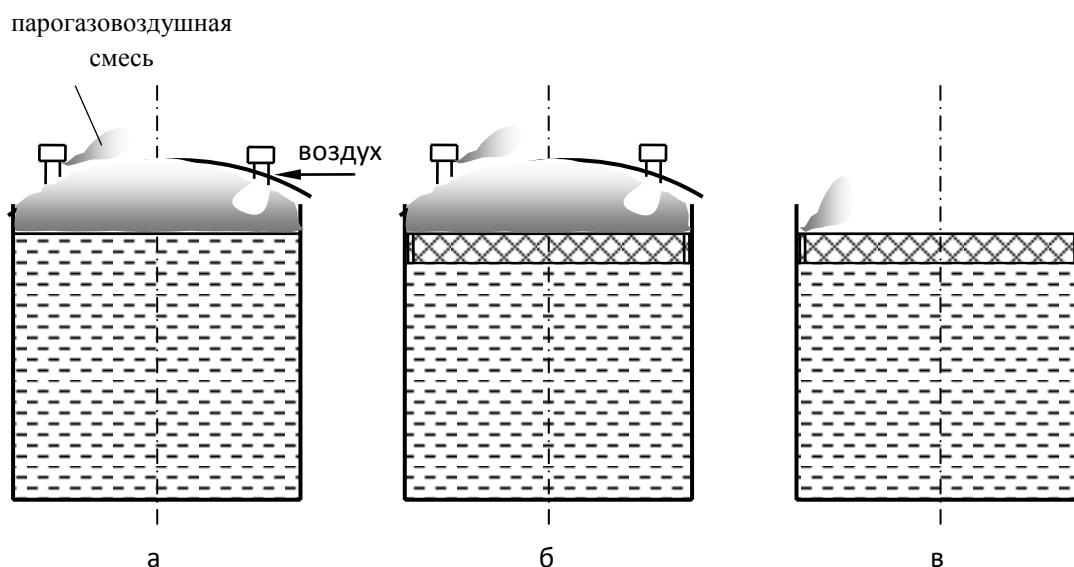
Взрыв паровоздушной смеси приводит к подрыву, а иногда срыву крыши с последующим горением на всей поверхности горючей жидкости. При этом даже в начальный период горение нефти и нефтепродуктов может сопровождаться мощным тепловым излучением в окружающую среду, а высота светящейся части пламени может составлять 1-2 диаметра горящего резервуара.

Факельное горение может возникнуть на дыхательной арматуре, местах соединения пенных камер со стенками резервуара, других отверстиях или трещинах в крыше или стенке резервуара при концентрации паров в резервуаре выше ВКПР. Если при факельном горении наблюдается черный дым или красное пламя, то это свидетельствует о высокой концентрации паров горючего в объеме резервуара. В этом случае опасность взрыва незначительная.

Сине-зеленое факельное пламя без дымообразования свидетельствует о том, что концентрация паров в резервуаре близка к области воспламенения и существует реальная опасность взрыва. На резервуаре с плавающей крышей возможно образование локальных очагов горения в зоне уплотняющего затвора, в местах скопления горючей жидкости на плавающей крыше.

В обвалованиях пожар может возникнуть из-за нарушения герметичности резервуара, задвижек, фланцевых соединений, наличия пропитанной нефтепродуктом теплоизоляции на трубопроводах и резервуарах.

В настоящее время для хранения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей чаще всего применяют резервуары следующих типов: с стационарной крышей и свободной поверхностью жидкости, с стационарной крышей и понтоном, с плавающей крышей (рис. 2.6).



**Рис. 2.6.** Резервуары: а. - с стационарной крышей; б.- с понтоном, в.- с плавающей крышей

При эксплуатации *резервуара с стационарной крышей*, горючая газовая среда может образовываться как внутри его, так и снаружи. При свободной поверхности жидкость интенсивно испаряется и концентрация паров внутри таких резервуаров быстро достигает равновесных значений, определяемых температурой жидкости. Технологическая температура жидкости значительно выше верхнего температурного предела распространения пламени (ВКПР). Во время откачивания жидкости внутрь резервуара поступает воздух, приводящий к разбавлению горючих газов и образованию пожароопасной смеси. В таком случае пожар, как правило, начинается со взрыва паровоздушной смеси, частичного или полного отрыва крыши и воспламенения жидкости на всей свободной поверхности.

При наполнении резервуара, а также при «малых дыханиях», пары стравливаются в атмосферу через дыхательные клапаны, разбавляются воздухом, и образуют горючую смесь. Т.е. в окрестности резервуара формируется взрывоопасная зона. По мере удаления от места истечения (выброса) паров их концентрация уменьшается.

После взрыва (вспышки) наружной паровоздушной смеси, если не произошло разрушения резервуара, пожар локализуется в виде факельного горения у места истечения паров. Чаще всего, факельное горение происходит на дыхательном клапане. Под действием тепловых потоков от факела пламени крыша резервуара деформируется и разрушается, горение (со взрывом или без) переходит на свободную поверхность жидкости.

Наличие *в резервуаре понтона* на поверхности жидкости препятствует ее испарению. При этом возможность образования горючей смеси внутри резервуара все равно сохраняется. Во время откачивания жидкости происходит ее испарение со стенок резервуара, и в надпонтонном пространстве постепенно накапливаются ее пары. Концентрация паров возрастает медленно т.к. при каждом откачивании в резервуар поступает воздух. Поэтому парогазовое простран-

ство в резервуаре с понтоном длительное время находится во взрывоопасном состоянии. При появлении источника зажигания воспламеняется, чаще всего, обедненная горючая смесь - близкая к НКПР.

Вероятность факельного горения на дыхательном клапане или других устройствах (например, пенокамерах) при наличии понтона в целом ниже, чем при свободной поверхности жидкости и возрастает со временем эксплуатации резервуара по мере накопления паров в надпонтонном пространстве. Если факельное горение возникает, то пожар развивается по тому же сценарию, что и на резервуаре без понтона. При этом в случае неполного разрушения и затопления понтона возникают дополнительные сложности в ходе тушения пожара.

В резервуаре с плавающей крышей горючая смесь образуется у мест выхода в атмосферу паров и газов через неплотности герметизирующего затвора. При появлении источника зажигания возникает локальный факел пламени, под действием которого постепенно разрушается гидрозатвор, крыша теряет плавучесть и тонет, пламенное горение распространяется на поверхность горючей жидкости. Кроме того, в результате нарушения технологического режима откачивания может произойти отрыв поверхности жидкости от плавающей крыши и образование паровоздушной смеси внутри резервуара со всеми вытекающими последствиями.

Развитие пожара при хранении больших масс нефти и нефтепродуктов можно подразделить на следующие уровни:

*первый уровень* – возникновение и развитие пожара в пределах одного резервуара без влияния на смежные;

*второй уровень* – выход пожара за пределы одного резервуара с возможным продолжением его в пределах резервуарной группы;

*третий уровень* – развитие пожара с возможным разрушением смежных резервуаров, зданий и сооружений, построек на территории предприятия за его пределами, а также поражение опасными факторами пожара персонала предприятия и населения ближайших районов.

## 2.2.2 Параметры пожара резервуара

Основными параметрами пожара резервуара являются:

- скорость выгорания жидкости,
- интенсивность излучения,
- высота факела,
- температура пламени.

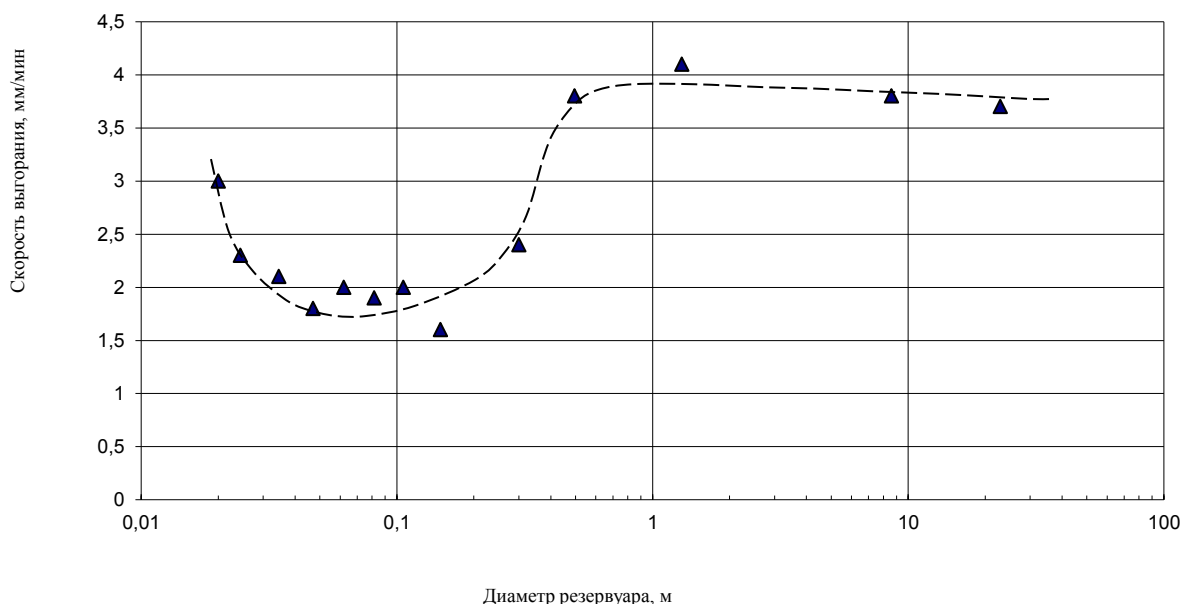
Все эти параметры взаимосвязаны. Скорость выгорания определяет высоту и форму пламени, интенсивность излучения из зоны горения в окружающую среду. Чем больше потери тепла излучением, тем ниже температура и теплосодержание пламени. В свою очередь от интенсивности излучения и размеров пламени зависит величина теплового потока, падающего на поверхность жидкости, соответственно и скорость ее испарения/выгорания.

От интенсивности излучения из зоны горения и размеров пламени зависит протяженность зоны теплового воздействия факела на окружающие объек-

ты. Конвективные потоки при открытых пожарах оказывают крайне слабое воздействие на окружающие объекты. Их влияние может проявляться на уровне верхней кромки резервуара, если под действием ветра они оказываются направленными параллельно плоскости земли. Однако, даже в этом случае, их действие не является устойчивым.

Так же как и в газовом фонтане, на резервуаре образуется и горит поток газо- или паровоздушной смеси. Горение в обоих случаях является диффузионным и турбулентным. Над резервуаром, в отличие от газового фонтана, факел пламени формируется восходящими конвективными потоками продуктов сгорания. Но скорость его истечения гораздо меньше, чем у газового факела и зависит от свойств горючего и ряда внешних факторов. Чем больше масса вещества, испаряющегося и сгорающего в единицу времени, тем выше скорость восходящего потока, тем сильнее его турбулентность. Вместе с этим, турбулизация потока пара благоприятствует созданию условия для образования и сгорания горючей смеси.

Режим горения зависит от диаметра резервуара. В горелках диаметром менее 0,03 м режим горения жидкости ламинарный, с увеличением диаметра скорость выгорания уменьшается, как это видно на примере бензина (рис. 2.7). В диапазоне от 0,03 до 1 м наблюдается переходный режим от ламинарного к турбулентному. При горении в резервуарах диаметром более 1 м пламена полностью турбулентные и скорость выгорания жидкости практически не зависит от диаметра.



**Рис. 2.7.** Влияние диаметра резервуара на скорость выгорания бензина

В свою очередь скорость выгорания определяется соотношением летучести жидкости и относительной излучательной способности. Светимость пламени обусловлена присутствием частиц углерода в продуктах горения. Излучение

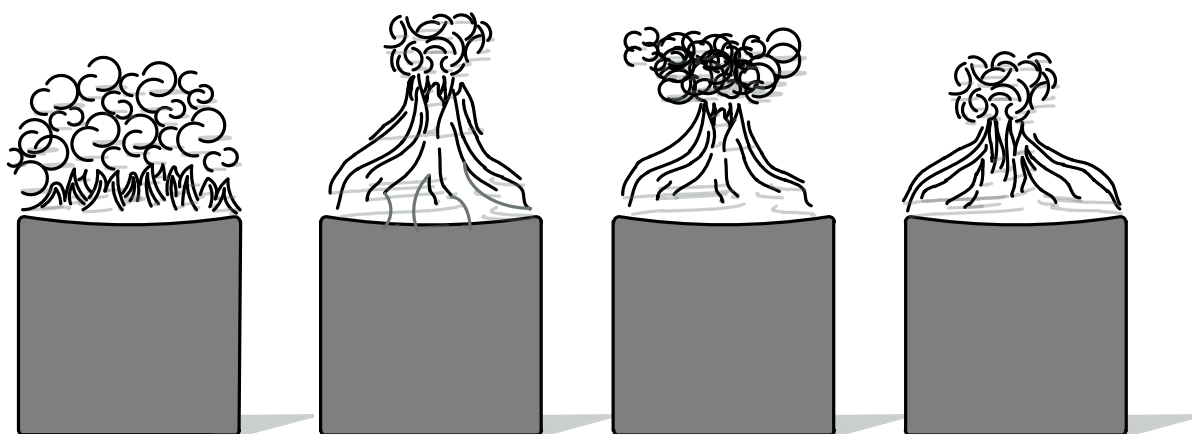
сажи увеличивает теплоотдачу пламени в окружающую среду. Соответственно, и большая часть энергии тратится на испарение жидкости.

При этом тепловой поток, падающий на поверхность зеркала жидкости от пламени ( $q_{\text{пад}}$ ) у бензина и керосина больше, чем требуется для поддержания стационарного горения ( $q_{\text{треб}}$ ), а у метанола – значительно меньше (таб. 2.1):

**Таблица 2.1 Значения теплового потока, падающего и требуемого, для поддержания стационарного горения**

Горючая жидкость	$q_{\text{треб}}$ , кВт	$q_{\text{пад}}$ , кВт
Бензиновая фракция	1,23	2,51
Керосин	1,05	1,08
Бензин	2,23	2,51
Метанол	1,22	0,21

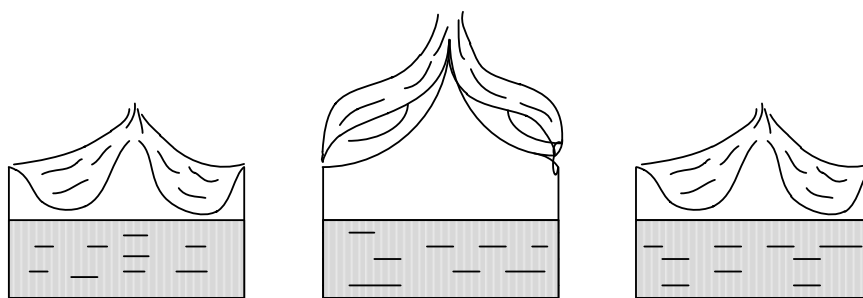
В результате этого процесс горения нефти и большинства нефтепродуктов в резервуарах не является устойчивым (рис. 2.8).



**Рис. 2.8.** Изменение высоты пламени при горении нефтепродуктов

За счет разности этих тепловых потоков над зеркалом жидкости накапливаются пары несгоревшего горючего, соответственно пламя вытягивается. Постепенно в зоне горения формируется облако, которое всплывает вверх, перемешивается с воздухом и сгорает за пределами основного факела пламени. После этого высота пламени уменьшается, и процесс повторяется (см. рис. 2.8).

Пламя спиртов является мерцающим. В этом случае недостаток лучистой энергии компенсируется конвективными тепловыми потоками, которые периодически достигают поверхности жидкости, вызывая ее испарение и сгорание (рис. 2.9).



**Рис. 2.9.** Изменение формы пламени при горении спирта

Как известно, излучательная способность пламени обусловлена тепловым излучением частиц углерода размером 10-100 нм, которые образуются в зоне горения. Находясь в пламени, они ведут себя как абсолютно черное или серое тело. Увеличение притока воздуха в зону горения приводит к увеличению полноты сгорания. Соответственно, с увеличением диаметра резервуара концентрация частиц углерода в пламени, его общая излучательная способность и скорость выгорания жидкости должны уменьшаться.

При горении жидкости на большой площади окислителя не хватает для образования горючей паровоздушной смеси над всей поверхностью одновременно. С увеличением диаметра резервуара высота пламени ( $H$ ) уменьшается и для нефтепродуктов не превышает ( $1 \div 1,5$ ) диаметра  $D$ . При соотношении  $H/D < 1$  пламя разделяется на ряд небольших очагов. Эти очаги не зависят друг от друга, не являются устойчивыми. Они случайным образом возникают и исчезают на произвольных участках поверхности зеркала жидкости. В результате пламя имеет неоднородную температуру, и дым образуется не только на периферии, но и в объеме зоны горения.

Степень облученности объектов вокруг горящего резервуара зависит от высоты пламени  $H$ . Установлено, что для маленьких резервуаров высота пламени фактически не зависит от их диаметра  $D$ . При этом если высота пламени, приведенная к диаметру резервуара ( $H/D$ ) больше 6, то величина  $H/D$  пропорциональна  $0,23 q_{\text{п}}^{2/5}$ , м. В резервуарах большого диаметра  $H/D < 6$ . При  $H/D < 2$  величина  $H/D$  почти линейно зависит от  $(q_{\text{п}}/D^{5/2})$ .

В результате обработки опубликованных данных о пожарах резервуаров и разливах жидкостей было получено выражение 2.1:

$$H = 0,23 q_{\text{п}}^{2/5} - 1,02D \quad (2.1)$$

Следует иметь в виду, что значение  $H$ , получаемое по данной формуле, соответствует некой усредненной высоте т.к. пламя над резервуаром непрерывно пульсирует по причинам рассмотренным выше. Формула (2.1) учитывает массовую скорость выгорания и низшую теплоту сгорания жидкости т.к. эти параметры определяют величину  $q_{\text{п}}$ . Если в резервуаре горит однокомпонентная (индивидуальная) жидкость, то скорость выгорания быстро достигает максимального значения, соответствующего температуре кипения и в дальнейшем не изменяется. Низшая теплота сгорания в этом случае также остается постоянной. При горении многокомпонентных жидкостей (сложного состава) состав

верхнего прогретого слоя изменяется т.к. происходит разгонка смеси. Характерным примером таких жидкостей является нефть, которая состоит из фракций, кипящих в разных интервалах температур (таб. 2.2):

*Таблица 2.2 Значения теплового потока падающего и требуемого для поддержания стационарного горения*

Фракции нефти	Температура разгонки, ° С
Бензиновая	40 - 180°C
Лигроиновая	120 - 200°C
Керосиновая	150 - 300°C
Минеральные масла	>350°C

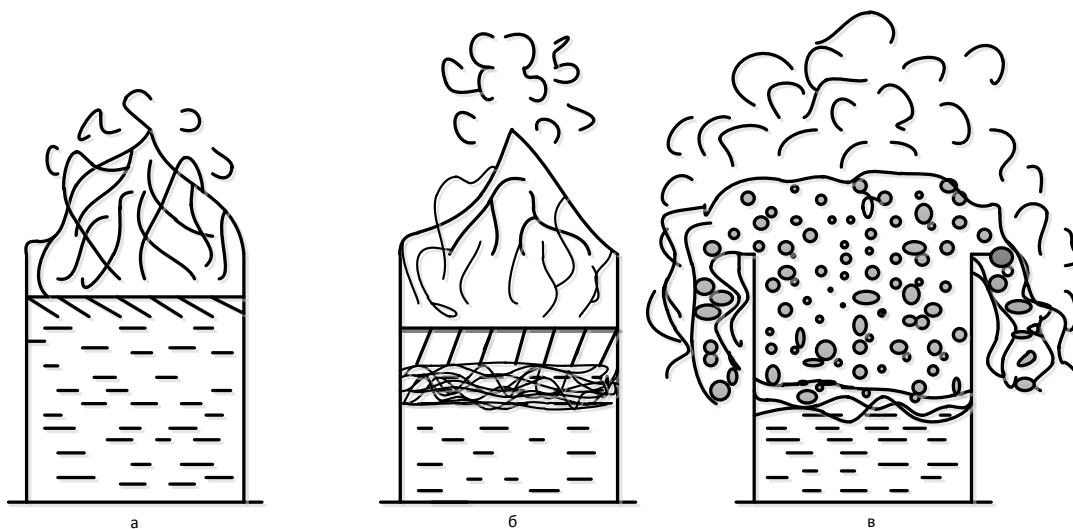
По мере улетучивания компонентов, имеющих низкую температуру кипения, температура кипения прогретого слоя возрастает. Соответственно изменяются скорость выгорания и низшая теплота сгорания, что должно сказываться на высоте пламени.

### **2.2.3 Вскипание и выброс жидкости при горении в резервуаре**

Пожары резервуаров часто сопровождаются вскипанием и (или) выбросом горячей жидкости. Чаще это происходит при горении нефти и нефтепродуктов. Примерно 60% пожаров резервуаров с нефтью сопровождается вскипанием, а каждый четвертый – выбросом. Вскипание проявляется как бурное вспенивание жидкости. Горящая пена переливается через борт резервуара, попадает в обвалование, выводит из строя технологическое и пожарное оборудование, приводит к срыву пенной атаки.

Наиболее опасным является выброс. При этом большие массы горящего продукта взлетают на высоту иногда равную 3-5 диаметрам резервуара, падая на землю, покрывают большие площади и продолжают гореть. Выбросы наносят большой материальный ущерб и часто сопровождаются человеческими жертвами.

Уже первые исследования этих явлений показали их связь с образованием гомотермического слоя. Было установлено, что вскипание нефти и высококипящих нефтепродуктов представляет собой вспенивание жидкости, которое происходит в результате вскипания капель воды диспергированных в массе вещества. Схема этого процесса показана на рис. 2.10.



**Рис. 2.10.** Схема процесса вскипания жидкости при пожаре резервуара

Если вода и горючая жидкость являются невзаиморастворимыми, то капли воды могут находиться во взвешенном состоянии продолжительное время только при достаточно высокой вязкости жидкости. К таким жидкостям относятся, например, нефть, минеральные масла, мазут и т.д.

Гомотермический слой, образующийся при возникновении горения (см. рис. 2.10а), в силу более высокой температуры имеет меньшую вязкость, чем остальная масса жидкости. Присутствие воды увеличивает скорость опускания его нижней границы и, в то же время, замедляет рост температуры.

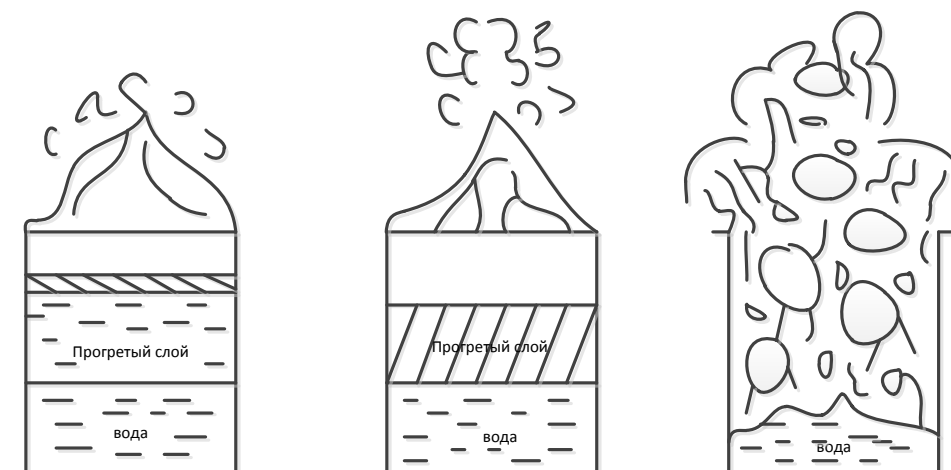
В результате этого капли воды, опускаясь вниз, концентрируются вблизи нижней границы гомотермического слоя (см. рис. 2.10б). Когда температура гомотермического слоя достигает температуры кипения воды, капли превращаются в пар и вспенивают жидкость (см. рис. 2.10в).

Вскипание может быть многократным. Его интенсивность зависит от длительности горения резервуара и степени обводненности нефтепродукта. При содержании влаги менее 0,3% вскипание нефти обычно не происходит, а при 20% и более вспенившаяся масса не горит. При влажности нефти 0,6% первое вскипание наступает примерно через 50 – 50 мин, а при 0,9% - через 40 – 50 мин.

Вскипание может происходить при подаче пены на поверхность жидкости, нагретой до температуры выше 100°C. Это относится как к «сухим», так и обводненным жидкостям.

Причиной выбросов при пожарах резервуаров с нефтепродуктами является вскипание воды, находящейся на дне резервуара или раствора пенообразователя, скопившегося там, в результате разрушения пены, подаваемой на тушение (рис. 2.11).





**Рис. 2.11.** Схема процесса выброса при горении нефтепродуктов в резервуарах

Вскипание воды, находящейся на дне резервуара, носит взрывной характер т.к. под слоем жидкости вода способна перегреваться до температур значительно выше  $100^{\circ}\text{C}$ . Чем выше температура перегретой воды, тем большее количество тепла аккумулируется в ее массе и затем расходуется на образование пара.

Сила выброса растет с увеличением степени перегрева. Считается, что выбросы нефтепродуктов происходят, когда температура гомотермического слоя достигает  $200^{\circ}\text{C}$  и выше.

Как правило, выброс носит пульсирующий характер с нарастанием высоты и объема факела и может длиться от 3 до 10 мин. Причиной растягивания этого процесса по времени считается неодновременное соприкосновение прогретого слоя с водой.

Следует иметь в виду, что реальное время выброса может весьма существенно (на несколько часов) отличаться от расчетного как в большую, так и в меньшую сторону. Это связывают со вскипанием в результате пенной атаки или наличия взвешенной воды в горящей жидкости.

Хотя закономерность не выявлена, можно предположить, что после *самопроизвольного* вскипания выброс должен наступать раньше т. к. температура гомотермического слоя либо не изменяется, либо продолжает расти, а расстояние от нижней его границы до воды уменьшается в результате перелива части жидкости через борт резервуара. Выброс после вскипания *в результате пенной атаки* должен наступать позже т.к. поток раствора пенообразователя, образующийся при разрушении пены, охлаждает жидкость и замедляет рост температуры гомотермического слоя.

Кроме того, вода может находиться не только на дне резервуара, но и скапливаться на деформированной поверхности затонувших или перекошенных понтона, плавающей или стационарной крыши, и т.д. В результате выброс может произойти при вскипании воды, находящейся значительно выше расчетного уровня.

Из всего изложенного следует, что вскипание и выброс могут происходить при горении в резервуарах не только нефти и нефтепродуктов. В общем

случае, для вскипания и выброса необходимо, чтобы в горячей жидкости или под ней находилась другая жидкость, которая нерастворима (или ограниченно растворима) в горячей и, кроме того, имеет меньшую температуру кипения.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите основные причины возникновения пожара для разных типов резервуара.
2. Назовите основные параметры пожара резервуара.
3. Как влияет излучательная способность пламени на скорость выгорания горючей жидкости в резервуаре.
4. Как влияет диаметр резервуара на высоту пламени при горении горючей жидкости в резервуаре?
5. Расскажите об особенностях горения однокомпонентных и многокомпонентных жидкостей.
6. Что такое гомотермический слой и как он образуется?
7. Назовите основные причины вскипания и выброса нефти из резервуара во время пожара.

## РАЗДЕЛ 2.3. ОТКРЫТЫЕ ПОЖАРЫ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

К открытым пожарам твердых горючих материалов (ТГМ) относят пожары открытых складов древесины и других твердых горючих веществ, лесные, степные и торфяные пожары, а также пожары зданий сооружений как результат развившихся внутренних пожаров.

### 2.3.1 Классификация твердых горючих материалов

Твердые горючие материалы можно классифицировать по нескольким признакам (рис. 2.12 и 2.13):

1. По химическому составу,
2. По поведению при нагревании.



Рис. 2.12. Классификация ТГМ по химическому составу

К *углеводородам* относят природные, искусственные и синтетические полимерные материалы, в состав которых входят углерод, водород, азот и кислород. По структуре углеводороды – это материалы однородного строения.

*Целлюлозосодержащие материалы* – отдельная подгруппа природных органических веществ, основой которых служит целлюлоза. К ним относятся полимерные материалы растительного происхождения (древесина, хлопок и др.), которые в отличие от искусственных и синтетических полимеров являются не однородными материалами, а смесью природных полимеров. Поведение в условиях пожара всех растительных материалов похоже, и по этой причине их и объединяют в одну группу.

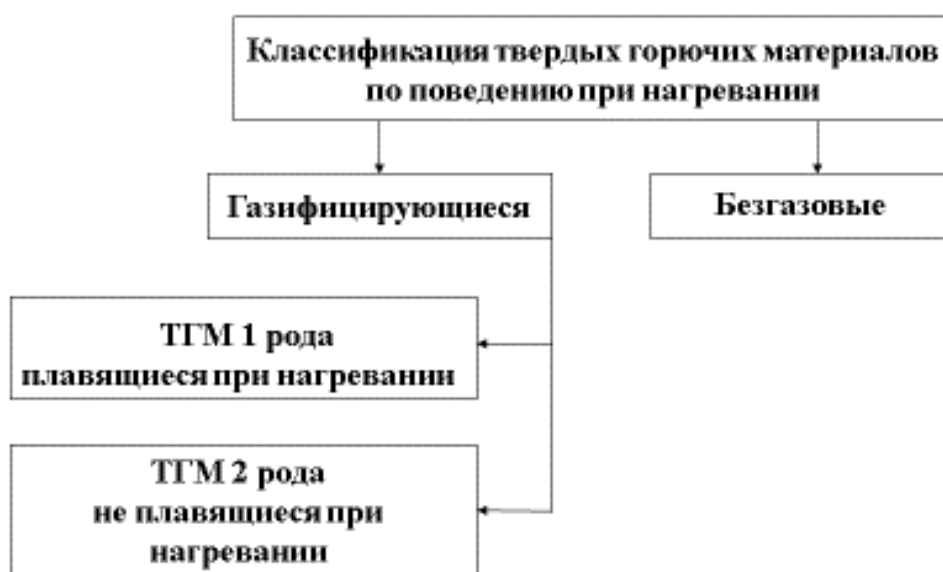
*Элементорганические соединения* – органические вещества, в состав которых входят такие элементы, как сера, фосфор, кремний, галогены и металлы. В условиях пожара элементорганические соединения образуют особо токсичные вещества.

*Неорганические твердые горючие вещества* – это металлы и неметаллы. Практически все *металлы* при нормальных условиях окисляются на воздухе. Но к горючим относятся только те, которые могут воспламеняться на воздухе от открытого источника зажигания средней мощности и самостоятельно гореть после его удаления. К наиболее горючим относятся щелочные и щелочноземельные металлы.

К *неметаллам* относят фосфор, мышьяк, кремний, серу. Механизм их воспламенения во многом напоминает особенности горения металлов.

ТГМ можно также классифицировать по поведению при нагревании (рис. 2.13):

1. Безгазовые – практически не переходящие в газообразное состояние.
2. Газифицирующиеся при нагревании.



**Рис. 2.13.** Классификация ТГМ по поведению при нагревании

Подавляющее большинство конденсированных веществ относятся ко второму классу. При нагревании они газифицируются, после чего осуществляется гомогенное горение продуктов газификации. В свою очередь газифицирующиеся ТГМ делят на две большие группы по тому, каким образом они переходят в парогазовое состояние. Твердые горючие вещества, которые переходят в газообразное состояние через жидкую фазу (в условиях повышенной температуры плавятся), принято называть *ТГМ первого рода*.

Процесс воспламенения ТГМ первого рода повторяет процесс подготовки и воспламенения горючих жидкостей. Их горение протекает в гомогенном режиме.

Твердые горючие материалы, которые переходят в парогазовое состояние минуя жидкую фазу за счет сублимации или термической деструкции молекул, принято называть *ТГМ второго рода*. При горении веществ этой группы возможен как гомогенный, так и гетерогенный режим горения.

### 2.3.2 Общие закономерности воспламенения и горения ТГМ

При контакте твердого вещества с источником зажигания возникает теплообмен. В реальных условиях могут иметь место три вида передачи тепла: конвекция, излучение и теплопроводность. Как правило, один из них является доминирующим. Если источник зажигания – открытое пламя, то преобладает конвекция, а если, например, нагретая спираль – тепловое излучение, а воспламенение, которое происходит за счет тлеющих частиц (искр), т.е. за счет теплопроводности.

Рассмотрим механизм воспламенения ТГМ. При контакте ТГМ с нагретым до высокой температуры источником зажигания происходят следующие процессы:

1. Нагрев поверхностного слоя до температуры фазового перехода (плавления или термического разложения). Если это материал растительного происхождения, то из него сначала начинает испаряться влага.

2. Дальнейший нагрев приводит к началу фазового перехода. Если это ТГМ 1-го рода, то происходит плавление и переход материала в жидкую фазу, затем нагрев расплава до температуры кипения или разложения. Если это материал 2-го рода – сразу начинается процесс сублимации или разложения с выделением летучих продуктов.

3. Образование горючей паровоздушной смеси и ее предварительный нагрев.

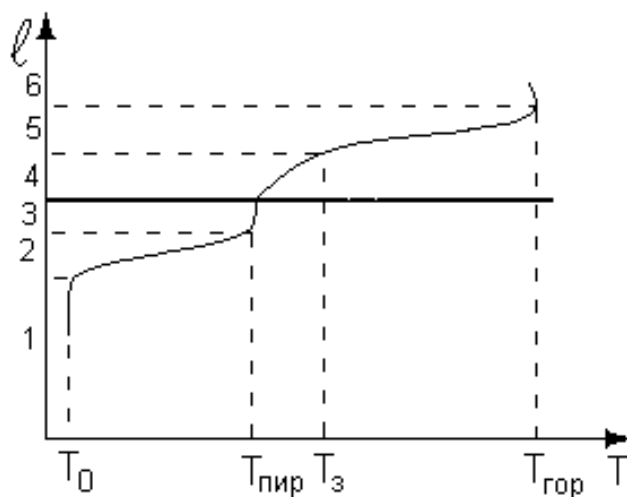
4. Самовоспламенение паровоздушной смеси с последующим горением.

Таким образом, если при горении жидкости тепловой поток, поступающий к поверхности, расходуется только на нагрев и испарение жидкой фазы, то для твердых веществ, кроме этого, необходимы затраты на плавление и разложение.

На каждой стадии воспламенения и горения ТГМ протекают специфические физико-химические процессы, которые определяют состояние системы. Этим стадиям соответствуют следующие зоны (рис. 2.14):

В очаге горения ТГМ геометрически можно выделить несколько характерных зон:

1. зона исходного материала;
2. зона предварительного нагрева материала до температуры физико-химических превращений;
3. зона фазового перехода, в которой происходит плавление или разложение материала;
4. зона образования горючей смеси и ее нагрев до температуры воспламенения;
5. зона фронта пламени, где выделяется основная часть тепловой энергии и наблюдается максимальная температура;
6. зона продуктов горения, где продукты реакции смешиваются с холодным воздухом.



**Рис. 2.14.** Характерные температурные зоны при горении ТГМ:  $T_0$  – температура начальная,  $T_{\text{пир}}$  – температура пиролиза,  $T_з$  – температура зажигания,  $T_{\text{гор}}$  – температура горения

Таким образом, процесс горения большинства ТГМ начинается с гомогенного режима. Горение характеризуется высокой скоростью распространения, мощными конвективными потоками и излучением.

Время воспламенения ТГМ зависит от скорости образования над поверхностью материала летучих компонентов в концентрации, превышающей нижней КПП. Процесс образования летучих компонентов идет с затратами энергии и для материалов разного состава начинается при различных температурах и протекает с разной интенсивностью. Способность материала сопротивляться нагреву без изменения химической структуры называется *термической стойкостью* материала.

### 2.3.3 Распространение пламени по поверхности ТГМ

После воспламенения ТГМ происходит перемещение фронта пламени по поверхности. Процесс распространения пламени по поверхности твердых веществ протекает за счет передачи части тепла, выделяющегося в зоне пламени, к поверхности горящего материала. Передача тепла от факела пламени осуществляется за счет лучеиспускания, конвекции и теплопроводности. В зависимости от условий горения соотношение количеств тепла, поступающих этими видами теплопередачи, может быть различным. Это обстоятельство и является причиной зависимости скорости распространения пламени по поверхности твердых горючих материалов от условий горения.

Прогрев участков поверхности, расположенных перед фронтом пламени, за счет теплоподвода излучением, конвекцией и теплопроводностью приводит к разложению слоев твердого вещества с образованием летучих продуктов. Выделяющиеся продукты термического разложения смешиваются с воздухом, образуя гомогенную кинетическую систему. При превышении концентрации горючих компонентов выше нижнего концентрационного предела воспламенения

(НКПР) смесь воспламеняется от пламени и сгорает в кинетическом режиме. Таким образом, процесс распространения пламени по твердым материалам (как и по жидкостям) характеризуется двумя существенными признаками:

- скорость перемещения пламени равна скорости образования горючей (выше НКПР) смеси над поверхностью материала;
- горение на передней кромке пламени всегда протекает в кинетическом режиме, т. е. горит предварительно перемешанная смесь горючего и окислителя.

Поэтому скорость распространения пламени по поверхности ТГМ зависит от условий горения.

Наибольшее влияние на скорость распространения пламени по поверхности ТГМ оказывают следующие *факторы*:

1. природа материала, его физико-химические свойства (скорость образования летучих продуктов, теплоемкость, теплопроводность, плотность и т.п.);
2. влажность материала;
3. ориентация в пространстве;
4. скорость и направление ветра;
5. начальная температура материала;
6. геометрические размеры материала (толщина, дисперсность).

Одновременно с распространением пламени по поверхности материала начинается процесс его *выгорания*. Закономерности выгорания твердых материалов существенно зависят от характера превращения твердой фазы в газообразные продукты.

Если разложение твердой фазы протекает в узком приповерхностном слое без образования углистого слоя, то в этом случае горение протекает с постоянной скоростью. На поверхности твердой фазы после воспламенения устанавливается постоянная температура, равная температуре кипения или возгонки вещества.

Механизм горения твердых веществ, протекающий с образованием углистого остатка на поверхности горения, более сложен. Так горят практически все вещества растительного происхождения, некоторые пластмассы, содержащие в своем составе негорючие или трудногорючие наполнители (талък, сажу и т.п.). К наиболее распространенным горючим веществам растительного происхождения такого типа относится древесина. В момент воспламенения за счет теплового потока от зоны пламени температура поверхностного слоя древесины быстро возрастает до 450-500°С. Происходит интенсивное разложение веществ с образованием летучих продуктов и древесного угля, при этом температура на поверхности повышается до 600°С.

По глубине горящей древесины имеют место области с различными физическими и физико-химическими характеристиками. Условно их можно разделить на 4 зоны:

- I – древесный уголь, состоящий на 99% из углерода;
- II – древесина с различной степенью пиролизованности;
- III – непиролизованная, сухая древесина;

IV – исходная древесина.

По мере выделения летучих продуктов из твердой фазы при горении древесины протекает переугливание материала на все большую глубину. Рост толщины углистого слоя обуславливает повышение его термического сопротивления и, следовательно, снижает скорость прогрева и пиролиза еще не разложившихся слоев древесины, и скорость пламенного горения постепенно снижается. Пламенное горение древесины прекращается при снижении массовой скорости выделения летучих до  $5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Толщина слоя угля при этом достигает 15-20 мм.

Основным количественным параметром, характеризующим процесс выгорания твердых материалов, является массовая скорость выгорания, которая представляет собой один из параметров, обуславливающих динамику пожара.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. По каким признакам классифицируются твердые горючие материалы?
2. На какие группы подразделяются ТГМ по своему химическому составу?
3. На какие группы подразделяются ТГМ в зависимости от поведения при их нагревании?
4. Назовите основные причины воспламенения твердых горючих материалов.
5. В чем заключается механизм воспламенения твердых горючих материалов?
6. Какой должна быть концентрация продуктов пиролиза древесины, чтобы произошло их воспламенение?
7. Как изменится время воспламенения древесины с увеличением ее влажности, плотности?
8. В чем заключается механизм распространения пламени по поверхности ТГМ?
9. Перечислите факторы, от которых зависит скорость перемещения фронта пламени по поверхности ТГМ.
10. Какой вывод о продолжительности горения можно сделать по глубине обугливания древесины?



## РАЗДЕЛ 2.4. ЛЕСНЫЕ И СТЕПНЫЕ ПОЖАРЫ

### 2.4.1 Классификация лесных пожаров, общие закономерности их развития

Лесные пожары являются одной из серьезнейших проблем российских лесов. Опасность лесных пожаров для населения проявляется в угрозе непосредственного воздействия на людей, их имущество, в уничтожении примыкающих к лесным пожарам поселков и предприятий, а также в задымлении значительных территорий.

Вероятность возникновения и распространения лесных пожаров существенно возрастает в сухую погоду, особенно, в жаркую. В этом случае происходит не только подсушивание, но и предварительный разогрев горючих материалов. Скорость распространения огня днем больше, чем ночью. В ночное время, кроме охлаждения материала за счет снижения температуры окружающей среды, происходит увеличение равновесной влажности горючего материала. На распространение лесных пожаров влияет рельеф местности. Если пожар распространяется вверх по склону, его распространению способствует предварительный разогрев лесных горючих материалов конвективными потоками нагретых продуктов горения. Скорость распространения пожара в этом случае больше, чем по горизонтальной поверхности. При распространении пожара вниз скорость распространения снижается.

Скорость распространения лесного пожара определяется, прежде всего, природой, характером размещения, влажностью горючих материалов, метеорологическими факторами. Одной из особенностей таких пожаров является неравномерность скорости движения отдельных участков фронта пламени (кромки пожара) из-за присутствия даже на сравнительно небольшой площади разнообразных горючих материалов, отличающихся способностью к возгоранию. Так, при наличии сухой травы, хвойного подростка фронт пламени быстро продвигается по ним вперед, образуя далеко выступающие языки пожара. И, наоборот, на переувлажненных местах при наличии мочажин происходит образование карманов из пожароустойчивых участков. Такую неравномерность движения пламени по фронту необходимо принимать во внимание при тушении лесных пожаров, поскольку возникает опасность окружения огнем пожарных расчетов.

Наиболее быстрое распространение лесного пожара происходит в случае достаточно равномерного распределения легковоспламеняющихся материалов по площади. Лесные горючие материалы по своей роли в возникновении, развитии и распространении пожара разделяют на три класса:

- проводники горения (сухая трава и торф, опавшая хвоя и листва, мхи);
- поддерживающие горение (валежник, кустарники, сучья, ветки);
- задерживающие горение (кустарнички брусники, черники, багульника, широколиственные травы, листовые породы деревьев).

На участках, где преобладают растения из класса задерживающих горение, лесные пожары практически не распространяются. Растительность, задерживающая горение, в естественном состоянии гореть не может вследствие сво-

ей высокой влажности (от 200 до 450 %) и особенностей химического состава. Леса, богатые черничником, наиболее безопасны в пожарном отношении.

К наиболее пожароопасным лесным насаждениям относятся: сосновые и лиственные леса, кедровые леса, лишайники, брусничники, багульники. В летний период времени количество пожаров в лесу становится максимальным (весенне-летний пожароопасный период). Основное влияние на пожарную опасность леса оказывают: осадки, температура и влажность воздуха, ветер и облачность.

Классификация лесных пожаров по характерным признакам представлена на рисунке 2.15.



**Рис. 2.15.** Классификация лесных пожаров по элементам насаждений

*Низовые пожары* – представляют собой пожары, при которых происходит горение сухого надпочвенного покрова, состоящего из мхов, лишайников, вереска, черники, кустарников, подстилки. При этом повреждаются подрост, подлесок, нижняя часть стволов и корни. Высота пламени до 2 – 2,5 м. Скорость горения зависит от ветра, влажности и количества горючих материалов. Низовой пожар характеризуется вытянутой формой площади пожара. Густой, светло-серого цвета дым на таком пожаре, сильно затрудняет оценку основных элементов фронта, тыла и флангов (рис. 2.16).



**Рис. 2.16.** Фронт низового пожара

Низовые пожары бывают беглые и устойчивые (медленные).

*Устойчивый* низовой пожар – такой пожар, который распространяется по нижнему ярусу леса (валежник, подлесок), охватывая нижние части стволов де-

ревьев и выступающие на поверхность корни. Скорость распространения не более 0,5 м/мин.

*Беглый* низовой пожар – охватывает напочвенный покров, валежник, самосев леса, хвойный подрост и подлесок, но за счет более благоприятных условий (сухой лес, ветреная погода), распространяется с повышенной скоростью (более 0,5 – 1 м/мин). Обычно обходит места с повышенной влажностью.

*Верховые пожары* – сложное, грозное и динамичное явление, которое приобретает порой характер стихийного бедствия. Даже небольшое промедление в принятии мер по ограничению распространения пожара может привести к поражению огнем значительной площади лесных массивов и расположенных в них населенных пунктов (рис. 2.17).

Верховые пожары распространяются по кронам и стволам растущих деревьев. Сгорают хвоя, листья, ветки и вся кровля. Скорость горения составляет от 5 до 30 км/ч. Вперёд летят искры, головни, слышен шум. Пожары бывают ураганные (беглые) и повальные (устойчивые).



**Рис. 2.17.** Верховой пожар

*Устойчивый* верховой пожар – является следующей стадией низового пожара, распространяется со скоростью 5 км/ч и уничтожают насаждения целиком. Горят одновременно деревья, подросток, подлесок и напочвенный покров. Вал огня по кронам идёт впереди наземного огня. Переход низового пожара на полог древостоя происходит при сильном ветре, а также в насаждениях с низко опущенными кронами, в разновозрастных насаждениях.

*Беглый* верховой пожар – возникает только при сильном ветре, огонь распространяется по кронам деревьев скачкообразно, опережая фронт низового пожара. Ветер также разносит горящие ветви, другие мелкие горящие объекты и искры, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров впереди основного очага. В ряде случаев огонь «перебрасывается» таким образом через реки, широкие дороги и другие рубежи для локализации пожара. «Скачки» таких пожаров распространяются со скоростью  $V = 15 - 25$  км/час, однако средняя скорость распространения беглого верхового пожара несколько меньше, так как после «скачка» пламени происходит задержка распространения

фронта пламени до тех пор, пока низовой пожар не пройдет участок с уже сгоревшими кронами.

*Верховые пожары* – это завершающая стадия пожара. Контур пожара яйцевидно-вытянутый.

Наиболее пожароопасны сосновые леса, потом лиственничные, пихтовые и еловые (медленное снеготаяние под мощным покровом), затем смешанные и, наконец, лиственные. Среди сосновых лесов самые горючие лишайниковые и вересковые боры, затем брусничные, далее кисличные и черничные и, наконец, травяные и сфагновые (болото). Среди еловых лесов наиболее горючи леса с брусничником, далее с черничником и затем травяно-сфагновые. При классификации подсчитывают число конкретных типов и их площадь, соотношенную к общей площади.

Верховые пожары выделяют большое количество тепла, при этом образуются мощные потоки продуктов горения и нагретого воздуха, создающие мощную конвекционную колонку (высотой до 5 км), за счет которой на высоту свыше 1 км поднимаются горящие угли. Попадая на еще негорящие участки леса, они образуют новые очаги, которые затем сливаются с основной зоной горения. Конвективная колонка увеличивает приток воздуха в зону пожара, за счет этого возникает ветер, способствующий усилению горения.

*Почвенный пожар* развивается в результате «заглубления» огня низового пожара в подстилку и торфяной слой почвы. Почвенные пожары подразделяются на *подстильно-гумусный*, при котором горение распространяется на всю толщину лесной подстилки и гумусного слоя, и *подземный* или *торфяной* при котором горение распространяется по торфянистому горизонту почвы или торфяной залежи под слоем лесной почвы. При таком пожаре сгорают корни, деревья вываливаются и падают, как правило вершинами к центру пожара. Пожарище в большинстве случаев имеет круглую или овальную форму. Скорость распространения огня незначительна – от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров в сутки.

#### **2.4.2 Закономерности развития степных пожаров**

Степные пожары являются наиболее опасными в периоды устойчивой засушливой погоды. Скорость распространения пожара достигает 700 м/мин. Такая высокая скорость распространения пламени при горении растительного покрова обуславливается характеристиками горючего материала. Трава и злаковые растения, по которым распространяется пожар (листья, веточки), имеют очень незначительные размеры сечения. Стебли высушенных растений представляют собой тонкостенные полые трубки и легко воспламеняются под воздействием фронта пламенного горения. Наличие ветра способствует увеличению скорости распространения пламени вследствие наклона факела пламени к еще негорящим материалам, а также из-за переноса искр воздушными потоками (рис 2.18).





**Рис. 2.18.** Степной пожар

Другой особенностью таких пожаров является сравнительно небольшая ширина фронта пламенного горения, что обусловлено малым запасом горючих материалов на единице площади пожара и высокой скоростью выгорания. Иногда при таких пожарах образуются так называемые смерчи, которые способствуют переходу огня через естественные и искусственные препятствия (реки, дороги, перепаханные полосы и т.д.) шириной до 12м.

Степные пожары, пожары лугов, полей и хлебных массивов могут переходить в лесные, торфяные пожары и вызывать пожары населенных пунктов, сельскохозяйственных и промышленных предприятий, к которым прилегают территории, покрытые соответствующими горючими материалами. Не отличаются по механизму распространения и выгорания от рассмотренных видов пожаров пожары буртов хлопка, стогов сена и соломы.

В случаях загорания этих объектов пламя быстро распространяется по их поверхности, а затем происходит процесс относительно медленного выгорания. Выгорание резко интенсифицируется при наличии ветра, когда скорость подвода воздуха к тлеющей поверхности горячего увеличивается. В этом случае возможен перенос горящих частиц и увеличение площади.

Возгорание сухой травы возможно от воздействия, оказываемого тепловым (световым) импульсом, величина которого составляет 10-12 кал/см. Обычно степные пожары возникают и развиваются в зависимости от времени суток. При этом самый опасный промежуток времени начинается с 10 и заканчивается 16 часами. К вечеру пожары утрачивают свою силу, в ночное время суток они существенно замедляются. Около шести возгорания снова усиливаются. Поэтому работы по тушению возгораний обычно проводятся ночью в связи с их большей эффективностью.

Степные (полевые) пожары тушат теми же способами что и лесные. Основными способами борьбы с пожарами являются: захлестывание кромки огня,

засыпка его землей, заливка водой (химикатами), создание заградительных и минерализованных полос, пуск встречного огня (отжиг).

Отжиг чаще применяется при крупных пожарах и недостатке сил и средств для пожаротушения. Он начинается с опорной полосы (реки, ручья, дороги, просеки), на краю которой, обращенном к пожару, создают вал из горючих материалов (сучьев валежника, сухой травы). Когда начнет ощущаться тяга воздуха в сторону пожара, вал поджигают вначале напротив центра фронта пожара на участке 20–30 м, а затем после продвижения огня на 2–3 м и соседние участки. Ширина выжигаемой полосы должна быть не менее 10–20 м, а при сильном низовом пожаре – 100 м.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. По каким параметрам оценивают степень опасности возникновения и развития лесных пожаров в различных регионах?
2. Как и по каким признакам классифицируются лесные пожары?
3. Назовите особенности горения лесных массивов.
4. В чем опасность неравномерного движения фронта пламени на лесном пожаре?
5. Что приводит к развитию верхового пожара в лесу и какова скорость его распространение?
6. Назовите особенности степных пожаров.
7. Чем опасны степные пожары?

## РАЗДЕЛ 2.5. РАЗВИТИЕ ПОЖАРОВ ЛЕСОСКЛАДОВ, ТОРФЯННИКОВ

### 2.5.1 Пожары на складах лесоматериалов

Пожары на складах лесных материалов имеют ряд характерных особенностей, наиболее существенными из них являются:

- большая скорость распространения фронта пламени по штабелям;
- мощное тепловое излучение от горящих штабелей;
- массовый разброс из конвективной колонки искр и головней и перенос их на большое расстояние, аэродинамические потоки увлекают за собой горящие доски и другие предметы, способные привести к возникновению новых очагов пожаров, как правило, на большом расстоянии от основной зоны горения (до нескольких сотен метров);
- большая скорость притока свежего воздуха в зону горения;
- большой объем зоны горения, что обусловлено значительным объемом продуктов термического разложения, выделяющихся с сильно развитой поверхности горючего материала.

Пиломатериал в штабелях горит ярким коптящим пламенем. Пламя имеет резко выраженный турбулентный характер. Высота светящейся части факела пламени в среднем равна удвоенной высоте штабелей. Тепловая радиация факела пламени очень высокая. Она вызывает обугливание и загорание древесины в штабелях на расстоянии более 25 м (рис. 2.19).



**Рис. 2.19.** Пожар на складе пиломатериалов

Развившиеся высокие температуры при пожаре усиливают тягу и вызывают мощные конвекционные потоки, которые приобретают иногда силу смерча и способны разносить горящие доски по воздуху на расстояние до 200 м и более.

В процессе пожара на складе пиломатериалов иногда возникает изменение направления конвекционных потоков, что затрудняет ориентировку при оценке вероятного направления распространения пожара.

Средняя линейная скорость распространения фронта пламени на складах лесоматериалов изменяется в пределах от 0,1 до 4 м/с. Скорость распространения огня зависит:

- от размеров материалов и изделий,
- влажности материалов и изделий.

Время и скорость распространения пламени определяются временем прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения. Таким образом, уменьшение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к увеличению скорости распространения пламени. Наоборот, увеличение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к возрастанию времени прогрева поверхностного слоя до температуры воспламенения и к уменьшению скорости распространения пламени. Таким образом, важной характеристикой для таких пожаров является коэффициент пожарной нагрузки ( $K_{П}$ ), который зависит от вариантов планировки штабелей и стеллажей на складах лесоматериалов (табл. 2.3). Как правило, коэффициент пожарной нагрузки на складах лесоматериалов больше единицы. Большое влияние на скорость распространения пламени оказывает влажность древесины. Во-первых, повышается теплоемкость влажного материала и увеличиваются затраты тепла на его нагрев. Во-вторых, требуются дополнительные затраты тепла на испарение влаги. В-третьих, увеличивается теплопроводность материала, что вызывает дополнительные потери тепла на его прогрев. Увеличение влажности материала с 11 до 28% приводит к снижению скорости распространения пламени в 4 раза.

*Таблица 2.3 Коэффициент пожарной нагрузки для складов лесоматериалов*

Способ складирования	Степень огнестойкости здания	Значения $K_{П}$ при высоте штабелей и стеллажей, м		
		2	3	4
Штабеля	I-II	0,92	1,4	1,84
	III	1,92	2,4	2,84
	IV-V	2,64	3,13	3,56
Стеллажи	I-II	1,33	2	2,67
	III	2,33	3	3,67
	IV-V	3,1	3,78	4,44

Как известно, ассортимент лесоматериалов, хранящихся на складах, достаточно широк: от щепы и древесных отходов, имеющих минимальные размеры 1 мм, до круглого леса с наименьшим размером бревен 10 см и более.

Скорость распространения пожара от штабеля к штабелю зависит от параметров, перечисленных выше, а также от величины противопожарных разрывов между группами штабелей, времени прошедшего с момента возникновения пожара, направления распространения (по ветру, против ветра и т. д.).

Горение распространяется по горючему материалу тогда, когда темпера-



тура материала достигает температуры воспламенения, т.е. той температуры, при которой состав и количество выделяющихся продуктов разложения обеспечивают образование горючей смеси их с воздухом. Таким образом, время распространения пламени на данный участок поверхности, а, следовательно, и скорость распространения пламени определяются временем прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения.

Следовательно, уменьшение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к интенсификации теплового воздействия на подготавливаемые к горению участки материала, а, следовательно, и к увеличению скорости распространения пламени.

Рассмотрим, как линейные размеры элементов пожарной нагрузки влияют на теплоотвод от поверхностных слоев материала. Чем больше, например, толщина досок, тем больше тепла теряется теплопроводностью на прогрев материала. Так как пламя распространяется преимущественно по поверхности материала, то увеличение линейных размеров элементов пожарной нагрузки приводит к возрастанию времени прогрева поверхностного слоя до температуры воспламенения, а, следовательно, к снижению скорости распространения пламенного горения.

Экспериментально показано, что скорость распространения пламени по штабелям из досок толщиной 25 мм в 2 – 2,5 раза выше, чем по штабелям из досок толщиной 50 мм.

Наиболее высокими скоростями выгорания отличаются пиломатериалы при их складировании в штабелях, так как штабели обладают сильно развитой поверхностью горения. Поэтому приведенная массовая скорость выгорания (с единицы площади пожара) может составлять при горении штабелей несколько десятков килограммов с 1 м<sup>2</sup> пожара в минуту.

Высота факела пламени при горении штабелей пиломатериалов равна 2 - 3 высотам штабеля. При скорости ветра больше 4 м/с факел пламени наклоняется и свободно перекрывает разрывы в 25 м и более (до 40 м). Высота факела пламени при горении круглого леса равна в среднем двум высотам штабеля.

При крупных пожарах в ближней к очагу горения зоне происходит изменение метеорологических параметров: скорости и направления воздушных потоков, температуры воздуха. Скорость подсоса воздуха к очагу горения может достигать 15 м/с и более. Температура воздуха вблизи пожара увеличивается до 100 – 150°С.

Большое влияние на распространение пламени на складах лесоматериалов оказывает направление и скорость ветра. Скорость распространения пламени по направлению ветра определяется по эмпирической формуле:

$$V_{\text{рп}} = V_p^0 \left( 1 + 0,14 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_B}{V_p^0}} \right) \quad (2.2)$$

Скорость распространения пламени против направления ветра определяется по эмпирической формуле:

$$V_{\text{рп}} = V_p^0 \left( 1 - 0,14 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_B}{V_p^0}} \right) \quad (2.3)$$

где

$V_p^0$  – скорость распространения пламени по штабелям без ветра, м/с;

$V_B$  – скорость ветра, м/с.

При увеличении скорости ветра до 20 м/с скорость распространения пламени увеличивается почти в 2 раза. Пожары на складах лесоматериалов, особенно пиломатериалов, характеризуются высокими скоростями выгорания. Это связано, прежде всего, с тем, что штабели, в которых хранятся пиломатериалы, образуют сильно развитую поверхность горения. Поэтому приведенная массовая скорость выгорания может быть высокой.

### 2.5.2 Торфяные пожары

Торф – отложения органического происхождения, состоящие из остатков болотных растений, лиственных и хвойных деревьев, трав, подвергшихся неполному разложению при недостаточном доступе кислорода.

Торф в естественных условиях не способен к самостоятельному горению из-за его высокой влажности. При длительном сохранении жаркой засушливой погоды создаются условия для возникновения торфяных пожаров даже на неосушенных полях. Торфяные пожары также могут возникать в местах, где не ведется промышленная разработка месторождений. Такие пожары случаются довольно часто в заболоченных лесах при сильных засухах и при мощности торфяного горизонта 0,2 – 0,7 м. Они возникают в середине лета – в период засухи и осенью после усыхания осок и злаков. При неблагоприятных метеоусловиях (после выпадения дождя) или после разрастания трав в июле-августе зона горения перемещается под поверхность, и горение продолжается в виде подземных очагов. Залежи торфа, подготовленные к разработке (осушенные), способны гореть даже весной. Особенно опасными с точки зрения возникновения и распространения пожара являются караваны, а также торфополя на предприятиях фрезерной добычи, где торфяная масса перерабатывается в мелкую крошку, а затем высушивается.

При отсутствии на поверхности внешних признаков горения распространение пожара представляет опасность для людей, так как они могут проваливаться в образующиеся и невидимые сверху пустоты. При почвенных торфяных пожарах выгорают корни деревьев, поэтому деревья падают в непредсказуемом направлении. Скорость распространения почвенных пожаров не более 1 м/сут.

На скорость распространения пожара большое влияние оказывает скорость ветра. Так, при скорости ветра 10 м/с и более горящая крошка легко поднимается воздушными потоками и переносится на значительные расстояния (до 50 м), образуя новые очаги пожара. Скорость распространения пожара достигает 20 – 25 м/мин. Форма площади пожара на торфополях чаще всего бывает угловой с расширением ее по направлению ветра.

Торфяная масса содержит в своем составе (в порах) достаточное количество воздуха, поэтому способна гореть по гетерогенному механизму (тлеть) даже без доступа воздуха, образуя подземные прогары, при этом верхний почвенный слой может оставаться несгоревшим. Это обстоятельство при тушении

пожаров представляют серьезную опасность для людей и техники.

Скорость распространения подземного пожара невелика и, как правило, не превышает нескольких метров в сутки. Характерной приметой подземного пожара является вывал деревьев с направлением вершин на выгоревшую часть.

Болота и заболоченные леса в тайге периодически испытывают воздействие таких пожаров. Вертикальное заглубление открытых пожаров торфа происходит при 200%-ной влажности торфа, а горизонтальное подземное распространение горения возможно при 300 – 500% влажности.

При переходе низового пожара в подземный, дальнейшее его развитие может продолжаться до весны, распространяясь со скоростью около 10 м/месяц. Прогрев почвы варьируется в пределах от 91 – 150°C до 200 – 700°C. Такие пожары не приводят к полному выгоранию торфа из-за присутствия в нем водоизбыточных горизонтов, и не изменяют его кислотнo-щелочные свойства. Растительность после таких пожаров легко восстанавливается, так как в местах распространения пожара образуется большое количество биогенных элементов (азота, фосфора) и органических гумусовых кислот.

Своевременно обнаружить торфяной пожар трудно так как на ранних этапах развития он может быть очень маленьким, выделять совсем мало тепла и дыма, и потому совершенно незаметным для имеющихся систем дистанционного наблюдения, камер с тепловизорами или летчиков-наблюдателей. Поэтому решающая роль в раннем обнаружении торфяных пожаров принадлежит наземному обследованию особо опасных территорий.

Меры борьбы с торфяными пожарами:

- опаживание населённых пунктов,
- установление противопожарных барьеров,
- обводнение торфяных залежей (для этого перекрывают устья обводных каналов), строятся водоёмы, проводится работа с населением.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Перечислите характерные особенности пожаров на складах лесоматериалов.
2. Каковы особенности пожаров на складах лесоматериалов?
3. При каком содержании влаги в древесине ее пламенное горение прекращается?
4. Чем характеризуются торфяные пожары?
5. Можно ли потушить торфяной пожар водой? До какой степени торф должен быть увлажнен?
6. Назовите меры борьбы с торфяными пожарами.

## ГЛАВА 3. ВНУТРЕННИЕ ПОЖАРЫ

### РАЗДЕЛ 3.1. ПАРАМЕТРЫ ВНУТРЕННИХ ПОЖАРОВ

#### 3.1.1 Особенности внутренних пожаров по сравнению с открытыми

Внутренние пожары протекают в ограниченном объеме, огражденном от окружающего пространства. Поэтому этот пожар слабее зависит от характеристик окружающей среды, таких как скорость и направление ветра, и в значительной степени определяется тепломассообменом зоны горения с внутренним объемом и окружающей средой.

Скорость, с которой будет развиваться пожар, зависит от того, насколько быстро может распространиться пламя от точки зажигания, вовлекая в процесс горения все возрастающие области горючего материала. Для установления процесса горения в закрытом пространстве требуется, чтобы пожар вышел за определенные критические размеры, позволяющие резко повысить температуру на уровне потолка (порядка 600° С). Хотя усиленные уровни излучения увеличивают локальную скорость горения, большее влияние на увеличение размера пламени и скорость горения оказывает увеличивающаяся площадь, охваченная пожарами. Вот почему необходимо проанализировать характеристики распространения пламени по горючим материалам.

Распространение пламени можно рассматривать как процесс наступления фронта горения. Внутри этого фронта передняя кромка пламени действует как источник тепла (которое нагревает горючее перед фронтом пламени до температуры воспламенения) и как источник вынужденного зажигания. Следовательно, скорость распространения пламени может зависеть как от физических свойств материалов, так и от его химического состава. Различные известные факторы, которые играют существенную роль при определении скорости распространения пламени горючих твердых веществ представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Факторы, влияющие на скорость распространения пламени по горючим материалам

Свойства материала		Факторы окружающей среды
химические	физические	
Состав горючего Наличие замедлителей горения	Начальная температура Ориентация поверхности Направление распространения Толщина. Теплоемкость Теплопроводность Плотность. Геометрия Однородность	Состав атмосферы Атмосферное давление Температура Действующий тепловой поток Скорость ветра

Внутренние пожары бывают *локальные* и *объемные*. Отличительной чертой локальных пожаров является наличие ярко выраженного струйного течения над очагом горения и четкой зоны раздела горячих газов, состоящих из продуктов горения и «холодного» воздуха окружающей среды. По характеру развития

струйного течения локальные пожары подразделяются на пожары с *постоянной* и *переменной* площадью горения.

Локальные пожары с постоянной площадью горения характерны для горения жидкостей с ограниченным зеркалом разлива. Пожары с переменной площадью горения наблюдаются при горении жидкого топлива с изменяющимся зеркалом горения и при горении твердых веществ и материалов в условиях сосредоточенной пожарной нагрузки.

*Объёмный пожар* – пожар, возникающий при горении распределённой пожарной нагрузки, когда области горения (размеры очага пожара, пламени) соизмеримы с размерами помещения.

Под *динамикой пожара* понимается изменение его основных параметров в пространстве и времени. К динамике пожаров относятся, прежде всего, процессы распространения пламени по предметам и слоям материалов пожарной нагрузки в различных пространственных направлениях, переброса пламени через противопожарные разрывы и сквозь противопожарные преграды, а также связанные с этим нагрев и задымление среды в помещении. Анализ динамики пожара позволяет уточнить факторы, способствовавшие развитию.

К внутренним пожарам относятся пожары в зданиях и сооружениях. По сравнению с открытыми пожарами внутренние пожары имеют свои особенности (табл. 3.2).

**Таблица 3.2. Особенности внутренних пожаров по сравнению с открытыми пожарами**

Параметр сравнения	Открытые пожары	Внутренние пожары
Условия теплообмена	Не происходит накопления тепла в газовом пространстве зоны горения. Температура пожара – температура пламени.	Происходит накопление тепла в газовом пространстве зоны горения. Температура пожара – средняя температура газовой среды в помещении.
Условия газообмена	Газообмен не ограничен конструктивными элементами зданий, он интенсивен и зависит от направления и силы ветра	Газообмен ограничен конструктивными элементами зданий, его интенсивность зависит от площади проемов.
Зона горения	Определяется распределением горючих веществ в пространстве и формирующими ее конвективными газовыми потоками	Определяется конструктивными элементами здания
Зона теплового воздействия	Определяется лучистым тепловым потоком, так как конвективные тепловые потоки уходят вверх	Меньше по размерам, так как стены здания играют роль экранов. Направление передачи тепла излучением может не совпадать с передачей тепла конвекцией
Зона задымления	Не создает больших препятствий для борьбы с пожаром, за исключением горения торфа и леса на больших площадях в безветренную влажную погоду.	Имеет особое значение, создает больше препятствий для борьбы с пожаром

Для характеристики динамики развития внутреннего пожара рассматривается наиболее общий случай пожара в здании, где происходит горение пожарной нагрузки, аналогичной древесине, которая равномерно распределена по поверхности пола; температура среды в помещении равна 20°C, высота помещения больше 3 м, но меньше 6 м; площадь помещения 20÷30 м<sup>2</sup>, а соотношение площади проемов к площади пола примерно равно 1 к 10.

В реальных условиях пожарная нагрузка в условиях реальной эксплуатации помещений и зданий состоит из огромного количества горючих материалов и изделий. При решении конкретных задач все это многообразие необходимо учитывать. Но для решения общих вопросов в качестве рассматриваемого материала берут древесину. Это связано с тем, что значительное число пожаров связано с горением древесины. В 70% случаев пожаров древесина была основным горючим материалом, а число погибших на этих пожарах составляет 92% от общего числа погибших. Поэтому при рассмотрении динамики развития внутреннего пожара за базовый горючий материал следует принимать древесину.

При развитии внутренних пожаров можно рассматривать три характерных периода:

– *первый (начальный)* – характеризуется сравнительно невысокой среднеобъемной температурой, отсутствием газообмена. Горение протекает за счёт воздуха, содержащегося в помещении. Этот период включает в себя время от возникновения до полного охвата пламенем поверхности горючей нагрузки. Продолжительность этой стадии зависит от вида и количества горючей нагрузки, мощности источника зажигания, конструктивно-планировочных характеристик помещения и может меняться в широких пределах. Температура в помещении характеризуется сильной неоднородностью, но среднее ее значение и темп изменения невелики. Эта стадия важна для оценки характера последующего развития пожара, разработки мероприятий по обеспечению безопасности эвакуации людей при пожаре, обнаружению и тушению пожара.

– *второй (основной)* – начинается после вскрытия проёмов и активизации процесса газообмена и продолжается до тех пор, когда вся пожарная нагрузка будет вовлечена в процесс горения. Этот период включает в себя период от полного охвата пламенем поверхности пожарной нагрузки до достижения постоянной скорости выгорания материалов пожарной нагрузки, характеризуется увеличением скорости тепловыделения и интенсивным изменением температуры в помещении. Ограждающие конструкции подвергаются быстро нарастающему тепловому воздействию. Все параметры, характеризующие развитие пожара, имеют максимальные и практически постоянные значения.

– *третий (заключительный)* – характеризуется уменьшением поверхности горения вследствие выгорания пожарной нагрузки. Начинается этот период с момента уменьшения скорости выгорания пожарной нагрузки и заканчивается моментом достижения исходного значения среднеобъемной температуры. Тепловыделение и средняя температура газовой среды в очаге пожара уменьшаются, но в начале этого периода остаются еще достаточно высокими и оказывают значительное тепловое воздействие на конструкции.

Первый и второй периоды принято называть начальной стадией пожара. Локальные пожары возникают в помещениях с сосредоточенной пожарной нагрузкой, расположенной на ограниченной площади. Большую группу локальных пожаров составляют пожары с изменяющейся поверхностью горения, главным образом тогда, когда пожарная нагрузка состоит из твердых материалов. В случаях, когда пожарная нагрузка равномерно распределена по поверхности пола, необходимо определить продолжительность начальной стадии пожара.

### 3.1.2 Параметры внутреннего пожара

О характере внутреннего пожара можно судить по совокупности большого числа его параметров: площади, температуре, скорости распространения, интенсивности тепловыделения, интенсивности газообмена, скорости выгорания, по пожарной нагрузке и т.д.

*Продолжительность (время) пожара* –  $\tau_{п}$ . Продолжительностью пожара называется время с момента его возникновения до прекращения процесса горения. Процесс горения может прекратиться самопроизвольно (самозатухание пожара), в результате выгорания горючего или применения огнетушащих веществ. В последнем случае  $\tau_{п}$  складывается из времени свободного развития и времени тушения.

*Площадь пожара* –  $S_{п}$ . Площадью пожара называется площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. Как правило, используется проекция зоны горения на горизонтальную плоскость. Горение жидкостей и газов является гомогенным. Горение ТГМ может протекать как в гомогенном, так и в гетерогенном режимах. Поэтому в площадь пожара включаются участки поверхности, на которых происходит как гомогенное, так и гетерогенное горение.

Составляющая площади пожара, над которой существует пламя –  $S_{гомог}$  зависит от притока воздуха в зону горения. При небольших размерах факела приток воздуха обеспечивает образование горючей смеси практически во всем его объеме. Тогда  $S_{гомог} = S_{п}$ . По мере распространения пожара, края фронта пламени удаляются друг от друга и воздуху все труднее проникать в зону горения. В результате этого внутри факела образуется область, в которой выделяющимся газообразным продуктам пиролиза не хватает окислителя для сгорания.

На внутренних пожарах часто встречается ситуация, когда нехватка кислорода приводит к ограничению объема пламени. Наступает момент, когда площадь, над которой возможно пламенное горение ( $S_{гомог}$ ), ограничена притоком воздуха, а общая площадь пожара увеличивается за счет роста площади гетерогенного горения ( $S_{гетерог}$ ).

*Площадь поверхности горения* –  $S_{пг}$ . Этот параметр характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении, т.е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме. Площадь поверхности горения определяет интенсивность выделения тепла на пожаре.

*Линейная скорость распространения пожара* –  $v_{\text{л}}$  (м/с, м/мин). Под этим параметром понимают путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени. Величина  $v_{\text{л}}$  определяет площадь пожара на данный момент. Она зависит от вида горючего, характеристик пожарной нагрузки и ее размещения, вида пожара и др. факторов.

Площадь пожара в реальных условиях зависит не только от скорости распространения пламени по поверхности материалов, но и от скорости его перехода с одного предмета на другой. Поэтому на  $v_{\text{л}}$  влияет также характер размещения горючих изделий и материалов на объекте, интенсивность теплового излучения, направление и скорость газовых потоков. При рассредоточенной пожарной нагрузке интенсивности излучения от горящего предмета может быть недостаточно для воспламенения материалов соседних предметов. Тогда пожар не распространится на всю площадь объекта и останется локальным.

Величина  $v_{\text{л}}$  зависит также от состава газовой среды, поступающей в зону горения. Так, на внутренних пожарах, по мере развития процесса горения, концентрация кислорода в газовой среде уменьшается, температура пламени и, соответственно, его излучательная способность снижаются. Это приводит к уменьшению скорости распространения пламени по поверхности горючего. Вместе с тем, температура газовой среды в помещениях часто достигает температуры воспламенения материалов до того как пожар охватит все помещение. В этих случаях перед фронтом пламени образуется газоздушная смесь на нижнем концентрационном пределе, по которой пламя распространяется со скоростью до 50 м/с, т.е. практически мгновенно. Это явление называется общей вспышкой.

*Массовая скорость выгорания* – масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени. Для газообразных горючих она равна скорости выброса вещества. Для жидкостей и твердых материалов она определяется как скорость потери массы т.е. показывает, какая масса твердого горючего материала или жидкости при горении переходит в газообразное состояние в единицу времени. Очевидно, что чем больше площадь поверхности, с которой происходит газо-выделение, тем выше потеря массы. Поэтому различают массовую скорость выгорания:

- абсолютную  $v_{\text{м}} = \frac{m}{\tau}$  (кг/с, кг/мин),
- удельную  $v_{\text{м}}^{\text{уд}} = \frac{v_{\text{м}}}{S_{\text{п}}} [\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2), \text{кг}/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)]$
- приведенную  $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = \frac{v_{\text{м}}}{S_{\text{пр}}} [\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2), \text{кг}/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)]$ .

На открытых пожарах, образующиеся (выбрасываемые) газы сгорают практически полностью в зоне горения. На внутренних пожарах из-за недостатка воздуха часто возникает ситуация, когда газы в помещении выделяются быстрее, чем успевают сгорать внутри помещения.

*Теплота пожара* –  $q_{\text{п}}$  (кВт) показывает какое количество тепла выделяется на пожаре в 1с и определяется выражением:

$$q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}} Q_{\text{н}} \quad \text{или} \quad q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}}^{\text{уд}} S_{\text{п}} Q_{\text{н}} \quad (3.1)$$

где:



$\beta$  – коэффициент полноты сгорания;

$Q_n$  – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

*Температура пожара* –  $T_n$ . Температурой открытых пожаров считается температура пламени. Она зависит, главным образом от вида горючего. Для наиболее распространенных ТГМ действительная температура горения составляет около 1150°C, жидкостей – 1250°C, газов – 1350°C.

Температурой внутренних пожаров на практике считается среднеобъемная температура газовой среды в помещении. Она ниже температуры горения материалов на открытом пространстве. Так, при горении ТГМ в помещении, среднеобъемная температура газовой среды редко превышает 1000°C.

В зависимости от соотношения массовой скорости образования горючих газов и скорости их сгорания внутри помещения различают два режима внутреннего пожара. В тех случаях, когда приток воздуха достаточен для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего, массовая скорость выгорания не зависит от расхода воздуха, поступающего в помещение. Такой режим получил название *«пожар регулируемый нагрузкой» (ПРН)*. В тех случаях, когда интенсивность газообмена ограничивает массовую скорость выгорания, т.е. приток воздуха в помещение не обеспечивает максимальную полноту сгорания горючих газов, пожар называется *«регулируемым вентиляцией» (ПРВ)*.

Если при режиме ПРН увеличить приток воздуха в помещение температура газовой среды понизится т.к. наружный воздух является значительно более холодным. Вскрытие проемов, откачивание дыма при ПРН также приводит к снижению температуры пожара. При таких способах регулирования газообмена возрастает интенсивность удаления тепла с продуктами горения  $q_{уд}$ . А так как  $q_n$  при ПРН не изменяется ( $v_m$  остается постоянной),  $q_{ср}$  становится отрицательной и температура пожара снижается.

Очевидно, что при ПРВ увеличение интенсивности газообмена вызовет рост массовой скорости выгорания, интенсивности тепловыделения  $q_n$  и, соответственно, температуры пожара. При длительном развитии пожара в режиме ПРВ в помещении накапливаются несгоревшие газы. Вскрытие проемов приводит к их разбавлению воздухом. Создается угроза образования, и воспламенения горючей газовой смеси – *объемной вспышки*.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите основные отличия внутренних пожаров от открытых.
2. В чем особенности зоны задымления внутреннего пожара по сравнению с открытым пожаром?
3. Температура какого пожара выше открытого или внутреннего? Ответ обоснуйте.
4. Как зависит массовая скорость выгорания от площади пожара?
5. Для чего необходимо знать значение линейной скорости распространения пожара?
6. Основные процессы и явления на внутренних пожарах. Их взаимосвязь.

7. Назовите основные параметры, характеризующие развитие внутренних пожаров.
8. Поясните в чем разница между удельной и приведенной массовой скоростью выгорания?
9. Назовите основные периоды развития внутреннего пожара.
10. В чем заключается механизм объемной вспышки? При каких условиях она происходит?
11. Какой пожар считается «пожаром регулируемым нагрузкой», а какой – вентиляцией?

## РАЗДЕЛ 3.2 ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ НА ВНУТРЕННИХ ПОЖАРАХ

### 3.2.1 Стадии и фазы развития внутреннего пожара

Рассмотрим наиболее общий случай развития пожара в здании с горением твердых горючих материалов (ТГМ), равномерно распределенных по поверхности пола, внутри помещения обычного типа с начальной температурой среды  $20^{\circ}\text{C}$ . Помещение обычного типа – это помещение малых размеров с высотой потолка 3 – 6 м, площадью 20 – 30 м<sup>2</sup>, с пожарной нагрузкой типа древесины.

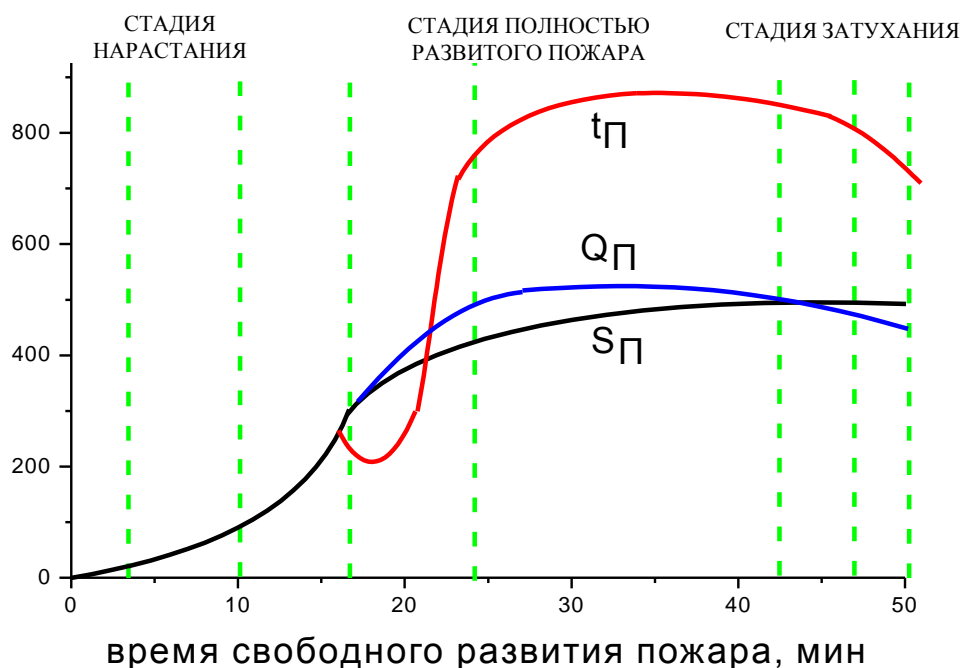
Проследим изменение параметров пожара во времени и в пространстве с момента загорания до выхода их на стационарный режим, в случае свободного развития пожара (без тушения).

Время протекания пожара можно разделить на три основных периода: стадию нарастания, стадию полностью развитого пожара и стадию затухания.

*Стадия нарастания пожара.* На этой стадии выделяют следующие фазы его развития: *возгорания* и *непосредственного начала пожара*. Стадия характеризуется относительно низкой средней температурой внутри помещения. Пожар в этот отрезок времени локализуется вблизи места своего возникновения и подчиняется основным закономерностям для открытых пожаров.

*В фазе возгорания* горение приобретает устойчивый характер. Большинство пожаров ТГМ начинаются, как правило, с возникновения от источника зажигания на небольшом участке открытого пламенного горения или тления. Сначала пламя медленно распространяется по поверхности горючего материала. Над очагом возгорания формируется восходящий конвективный газовый поток как начальный этап процесса газообмена. Пламя проявляет тенденцию к распространению по поверхности горючего материала, нагревая его. Продолжительность этой фазы пожара колеблется обычно от 1 до 3 мин (рис. 3.1).

*В фазе начала пожара* интенсивность возникших на первом этапе процессов нарастает: увеличиваются размеры факела пламени, и оно выходит за границы очага возгорания. Возрастает вклад лучистой составляющей теплопереноса. Среднеобъемная температура в помещении постепенно увеличивается. Продолжительность фазы начала пожара в среднем составляет 5 – 10 мин. На стадии нарастания возникший пожар, увеличивая охваченную пламенем площадь, достигает момента, с которого значительную роль начинает играть взаимодействие пламени и горячих дымовых газов с поверхностями, ограничивающими помещение (потолок, стены), включая их теплообмен. К концу этой стадии пожара среднеобъемная температура повышается до  $260 - 300^{\circ}\text{C}$ , подготавливая тем самым условия для его резкого нарастания.



**Рис. 3.1.** Изменение основных параметров пожара во времени

Пожар переходит в *стадию полностью развитого*, во время которой в горение вовлекаются практически все находящиеся в помещении горючие материалы, а пламя стремится занять весь объем помещения. Стадия полностью развитого пожара включает *фазу полного охвата помещения пламенем*, *фазу максимальной интенсивности пожара* и *фазу стационарного горения*.

*Фаза полного охвата* помещения пламенем непродолжительна по сравнению с длительностью двух других фаз на этой стадии пожара, но фактически рассматривается как поворотное событие в развитии пожара, подобное такому явлению, как зажигание. Скорость процесса распространения горения резко нарастает. Распространение пламени происходит уже не только по поверхности горючих материалов, а в основном под действием конвективных и лучистых тепловых потоков. В качестве источника зажигания для горючих веществ и материалов выступают нагретые газы и ограждающие помещение поверхности. Происходит *объемная вспышка*.

При температуре в помещении  $>300^{\circ}\text{C}$  происходит разрушение остекления, что приводит к притоку свежего воздуха, интенсификации газообмена и распространению пожара за пределы помещения. Из-за поступления холодного воздуха среднеобъемная температура может кратковременно снизиться. Однако в связи с усилением газообмена пожар переходит в новую фазу: *фазу максимальной интенсивности*. Резко возрастают значения таких параметров, как полнота сгорания и скорость выгорания пожарной нагрузки. Соответственно резко возрастает и общее тепловыделение на пожаре. Температура, несколько снизившаяся в момент разрушения остекления, снова возрастает, достигая  $600 - 1000^{\circ}\text{C}$ . Процесс резко интенсифицируется. Площадь пожара, среднеобъемная температура в помещении, интенсивность выгорания пожарной нагрузки и степень задымления достигают к концу этой фазы своих максимальных значений.

В зависимости от проемности помещения пожар в этой фазе может стать регулируемым вентиляцией. На практике это случается в большинстве помещений. При достаточной величине пожарной нагрузки пожар переходит в следующую фазу: *фазу стационарного горения*. Параметры пожара стабилизируются. Это обычно наступает на 20 – 25-й минуте от момента возгорания. В зависимости от количества горючего продолжительность этого периода может длиться 20 – 30 мин и более. На стадии полностью развитого пожара из-за высокой интенсивности тепловыделения усиливается угроза соседним помещениям. Пламя, вырываясь через оконные и дверные проемы, может распространить пожар на остальную часть здания, а также на соседние строения. На этой стадии пожара возможно разрушение несущих конструкций, частичное или полное обрушение здания. По мере того как снижается масса пожарной нагрузки и в составе горючих веществ все меньше и меньше остается летучих продуктов, интенсивность горения начинает снижаться.

Пожар переходит в *стадию затухания*. Переход в эту стадию часто определяют по снижению среднеобъемной температуры в помещении до уровня 80 % от ее максимального значения. Основными этапами этой стадии являются: *фаза снижения интенсивности горения и фаза догорания*.

Для *фазы снижения интенсивности горения* характерно уменьшение количества пожарной нагрузки, уменьшение вклада лучистой составляющей переноса тепла из-за понижения среднеобъемной температуры и повышения оптической плотности среды в связи с задымлением. К замедлению горения приводит также уменьшение концентрации кислорода в помещении, затруднения, связанные с выходом летучих продуктов через образовавшийся толстый слой углистых остатков и достигшее предельных значений содержание в помещении инертных продуктов горения. Горение углистых остатков происходит по беспламенному гетерогенному механизму. При сокращении суммарной площади горения площадь пожара может даже возрасти.

*Фаза догорания* представляет собой обычно довольно длительный процесс гетерогенного горения и медленного тления, в конце которой пожар полностью прекращается. При этом не исключаются рецидивы локальных очагов пламенного горения. Следует сказать, что описанный сценарий внутреннего пожара хотя и является наиболее распространенным, не всегда реализуется. В некоторых случаях полного охвата помещения пламенем может не произойти, и пожар заканчивается значительно раньше: либо загоревшийся предмет, находясь в изолированном положении, сгорает полностью, и пожар не распространяется на другие горючие материалы, либо он самопроизвольно прекращается из-за недостаточной вентиляции или малого содержания в помещении кислорода.

Однако, описанный сценарий внутреннего пожара, хотя и является наиболее распространенным, не всегда реализуется. В некоторых случаях полного охвата помещения пламенем может не произойти, и пожар заканчивается значительно раньше: либо загоревшийся предмет, находясь в изолированном положении, сгорает полностью, и пожар не распространяется на другие горючие материалы, либо он самопроизвольно прекращается из-за недостаточной венти-

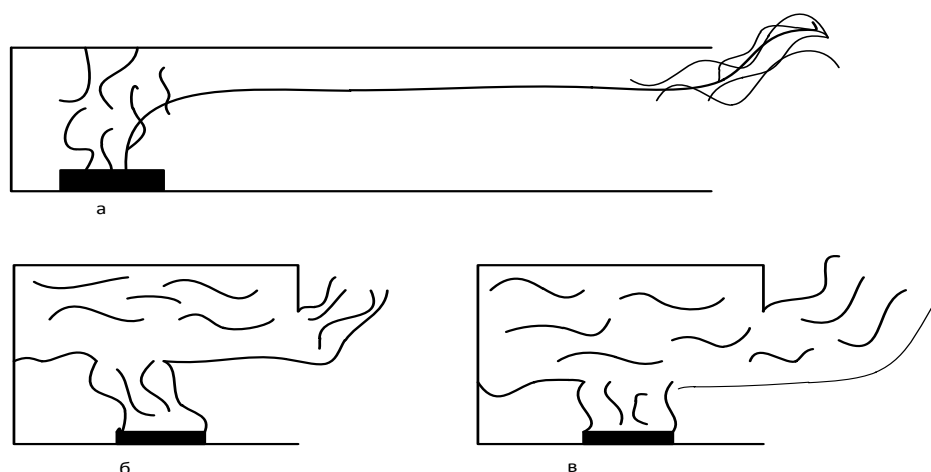
ляции или малого содержания в помещении кислорода.

В настоящее время большинство объектов оборудуются автоматическими системами пожарной сигнализации и пожаротушения. Автоматические системы сигнализации должны срабатывать уже на фазе возгорания пожара. Автоматические системы пожаротушения должны включаться на фазе возгорания и непосредственного начала пожара. Тушение пожара передвижными силами начинается, как правило, через 10 – 15 мин после извещения, т. е. через 15 – 20 мин после его возникновения.

### 3.2.2 Факторы, влияющие на нарастание пожара в закрытом помещении

Если пожар происходит в помещении, то часть выделяющегося тепла в виде нагретых дымовых газов скапливается и растекается под потолком, который в результате этого разогревается. Этот процесс еще больше усиливается, если высота факела пламени начинает превышать высоту комнаты, резко увеличивая приток тепла к потолку.

Это, в свою очередь, вызовет все возрастающий лучистый тепловой поток от потолка в окружающее пространство и приведет к росту облученности горючих материалов. В результате возрастание скорости и интенсивности тепловыделения приведет к еще большему повышению температуры потолка. Нарастающая интенсивность теплового излучения потолка и припотолочного слоя дыма будет способствовать расширению области горения за счет зажигания горючих материалов за пределами первоначального очага пожара (рис. 3.2). Как показали исследования, максимальная скорость выгорания пожарной нагрузки внутри помещения в 3 раза превышает этот параметр для открытого пожара при одновременном уменьшении втрое времени достижения наибольших скоростей выгорания.



**Рис. 3.2.** Взаимодействие факела пламени с потолком:

а — потолок коридора, б — потолок в помещении с широким проемом; в — потолок помещения с узким проемом

Характер взаимодействия факела пламени и горячих дымовых газов с потолком и его последствия для развития пожара, могут быть различными. В случае потолка коридорного типа увеличивается вероятность возгораний в удаленных от очага пожара местах

Большое влияние на скорость распространения внутреннего пожара оказывают горючие свойства и характер распределения пожарной нагрузки внутри помещения. Быстро горящие предметы, т. е. обладающие высокой скоростью высвобождения энергии, могут создавать значительный лучистый тепловой поток.

Скорость нарастания пожара может увеличиться, если пламя перекинется на вертикальные горючие поверхности помещения или если имеется пространственная конфигурация, способствующая снижению теплопотерь и взаимному облучению горящих поверхностей. Примерами таких ситуаций могут служить возгорания в углу помещения, под кроватью, между близко расположенными предметами мебели, такими как кровать и гардероб. На расширение площади пожара может оказать влияние и специфическая природа некоторых горючих материалов. Так, при определенных условиях могут расплавиться и потечь термопластичные полимеры, например потолочные плиты из полистирола, образуя дождь из горящих капель, падающих на расположенные ниже поверхности.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Охарактеризуйте основные стадии и фазы свободного развития внутреннего пожара.
2. Как изменяются теплота, температура и площадь пожара во время его свободного развития?
3. По какой причине происходит кратковременное снижение температуры пожара во время фазы полного охвата помещения пламенем?
4. В чем заключается явление объемной вспышки?
5. Перечислите факторы, влияющие на нарастание пожара в закрытом помещении.
6. Какова роль потолка в помещении при распространении внутреннего пожара?
7. Как влияет характер распределения пожарной нагрузки внутри помещения на нарастание внутреннего пожара?

## РАЗДЕЛ 3.3. ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООБМЕНА НА ВНУТРЕННЕМ ПОЖАРЕ

### 3.3.1 Температурный режим внутреннего пожара

Выделяющееся при пожарах тепло является основной причиной развития пожара и возникновения многих сопровождающих явлений. За счет этого тепла нагреваются окружающие материалы и вещества. Тепловыделение на пожаре сопровождается движением газовых потоков и задымлением определенного пространства около зоны горения.

Количественной характеристикой изменения тепловыделения на внутреннем пожаре в зависимости от различных условий горения служит *температурный режим*. Под *температурным режимом* понимают *изменение температуры во времени*. Температуру пожара для практических расчетов определяют из уравнения теплового баланса. Для конкретных условий теплотой пожара определяется темп изменения среднеобъемной температуры среды в помещении ( $T_n$ ), которая является основной характеристикой пожара при оценке пределов огнестойкости строительных конструкций, реализации в помещении условий, представляющих опасность для людей.

Строгий расчет температурного режима пожара представляет собой трудоемкую задачу, особенно при изменении площади горения, что обычно и наблюдается при пожарах. Такие расчеты требуют значительных трудозатрат и в практике пожарно-технической экспертизы (ПТЭ) они достаточно редки, хотя и производятся при определении динамики прогрева строительных конструкций, прогнозировании интервала времени до потери ими прочности и несущей способности, достижения температуры разрушения оконных стекол и т.д. Гораздо проще выполняется расчет, который дает достоверные результаты при неизменной площади пожара, если в качестве пожарной нагрузки выступают жидкие вещества. Тепловой баланс составляют также для того, чтобы выявить количественное распределение тепловой энергии на пожаре.

Кривая изменения температуры внутреннего пожара во времени показана на рис. 3.3. Т.к. скорость роста и абсолютное значение температуры пожара в каждом конкретном случае имеют свои значения и особенности, введено понятие *стандартной температурной кривой* (рис. 3.3, кривая 2), обобщающей наиболее характерные особенности изменения температуры внутренних пожаров (на основании натуральных опытов пожаров в жилых и промышленных зданиях). *Стандартная температурная кривая* описывается уравнением:

$$t_{п.ст} = 345 \cdot lg \cdot (8\tau + 1) \quad (3.2)$$

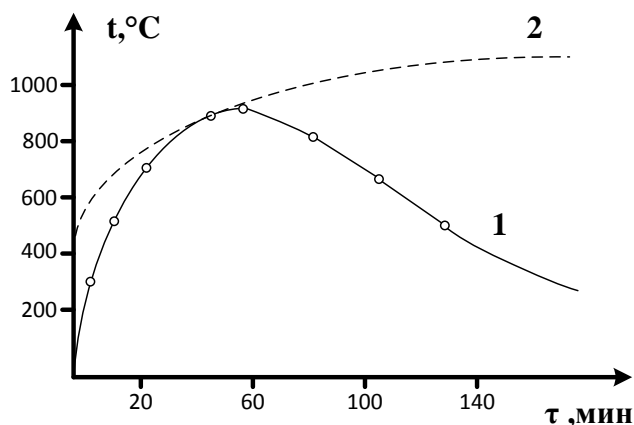
По изменению температуры всю продолжительность пожара можно разделить на три характерных периода.

Начальный период, соответствующий периоду роста пожара, характеризуется сравнительно невысокой среднеобъемной температурой.

Основной период, в течение которого сгорает 70 – 80 % общей нагрузки горючих материалов. Окончание основного периода соответствует моменту,



когда среднеобъемная температура достигает наибольшего значения или уменьшается не более чем до 80 % от максимального значения.



**Рис. 3.3.** Изменение температуры внутреннего пожара во времени:  
1 - кривая конкретного пожара; 2 - стандартная кривая.

Заключительный период характеризуется убыванием температуры вследствие выгорания пожарной нагрузки.

На внутренних пожарах на температуру пожара влияют: вид горючего материала, величина пожарной нагрузки и ее расположение, площадь горения, площадь пола, высота помещения и т.д.

По интенсивности газообмена, определяющей скорость роста и максимальное значение температуры пожаров, все помещения можно разделить на две группы.

*Помещения, у которых отношение площади приточных проемов к площади пожаров ( $S_V/S_{П}$ )  $< 1/12$  относятся к помещениям с низкотемпературным режимом пожаров, т.е. для этой группы помещений развитие процесса горения, а следовательно, и интенсивности тепловыделения, сдерживают поступление воздуха и в объем самого помещения, и в зону горения.*

*Помещения, у которых отношение площади приточных проемов к площади пожаров ( $S_V/S_{П}$ )  $> 1/12$  относятся к помещениям с высокотемпературным режимом пожаров, т.е. в этих помещениях процесс горения развивается так же, как в условиях открытого пожара или близких к ним. Различие температур пожара в помещениях с низкотемпературным и высокотемпературным режимами в среднем составляет 200 – 250°C. При этом необходимо иметь в виду, что такая же картина может сохраниться, когда горючие материалы с высокой теплотворной способностью горят в помещениях с низкотемпературным режимом, а горючие материалы с низкой теплотворной способностью горят в помещениях с высокотемпературным режимом.*

Высота помещения оказывает существенное влияние на температуру пожара: в высоких помещениях скорость роста температуры пожара выше, а значение температуры пожара ниже, чем в низких, так как в высокотемпературных помещениях с интенсивным газообменом, несмотря на интенсивное тепловыделение и высокую температуру в верхней части помещения, в нижней части помещения возможно пребывание людей, благодаря тому, что происходит ин-

тенсивный приток воздуха и отток продуктов горения. Средняя температура такого пожара может быть невелика. В помещениях малой высоты значение температуры выше, чем в высоких. Это объясняется тем, что в высоких помещениях коэффициент избытка воздуха больше, но и потери тепла из зоны горения тоже больше. Для этой группы помещений развитие процесса горения сдерживает поступление воздуха и в объём самого помещения, и в зону горения.

В помещениях с малой интенсивностью газообмена и низкой температурой горение происходит с недостатком воздуха. Температура может быть одинакова по всему объёму и за счёт слабого оттока воздуха может быть высокой. Это надо учитывать при тушении пожаров. Максимальная температура пожара обычно выше среднеобъёмной и наблюдается в зоне горения. По мере удаления от зоны горения температура снижается. Температура пожара является функцией от остальных параметров пожара в частности от интенсивности газообмена.

Интенсивность газообмена внутреннего пожара зависит от конструктивных особенностей здания: высоты его, количества проёмов, их площадей, а также от площади пожара. Массовая скорость выгорания при внутреннем пожаре повышается с увеличением интенсивности газообмена, а затем некоторое время остаётся постоянной. Приток воздуха в помещение увеличивает температуру пожара при неизменной площади пола и пожарной нагрузки. Когда газообмен близок к условиям открытого пожара, то массовая скорость выгорания уже не зависит от размеров проёмов, а температура пожара достигает максимума.

### 3.3.2 Тепловой баланс внутреннего пожара

При экспертном исследовании пожара важным является установление его температурного режима, направления развития и продолжительности. Определение температуры пожара экспериментальным и расчетным путем чрезвычайно сложно. Для инженерных расчетов при решении ряда практических задач температуру пожара определяют из уравнения теплового баланса. Тепловой баланс составляют для того, чтобы выявить количественное распределение тепловой энергии на пожаре. В общем виде тепловой режим можно написать следующим образом:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi Г} + Q_{К} + Q_{Л} \quad (3.3)$$

где

$Q_{\Pi}$  – тепло, выделяющееся на пожаре, кДж;

$Q_{\Pi Г}$  – тепло, которое поглощается продуктами горения, кДж;

$Q_{К}$  – количество тепла, передаваемого из зоны горения конвекцией воздуху, омывающему зону горения, кДж;

$Q_{Л}$  – тепло передаваемое из зоны горения излучением.

Внутренний пожар – это более сложный процесс горения по сравнению с открытым пожаром, т.к. объём, где происходит горение, ограничен и не всё тепло теряется безвозвратно. Поэтому, тепловой баланс записывают в несколько иной форме:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{пг.о}} + Q_{\text{пг.у}} + Q_{\text{конст}} + Q_{\text{гор.мат}} + Q_{\text{изл}} \quad (3.4)$$

где

$Q_{\text{п}}$  – тепло, выделяющееся на пожаре, кДж;

$Q_{\text{пг.о}}$  – тепло, содержащееся в продуктах горения, находящихся в помещении, кДж;

$Q_{\text{пг.у}}$  – тепло, содержащееся в продуктах горения, удаляющихся из помещения, где произошел пожар, кДж;

$Q_{\text{констр.}}$  – тепло, поступающее к строительным конструкциям и оборудованию конвекцией и излучением, кДж;

$Q_{\text{гор.мат.}}$  – тепло, поступающее к горючим материалам конвекцией и излучением, кДж;

$Q_{\text{изл.}}$  – тепло, излучаемое из зоны горения за пределы помещения, где произошел пожар, через проемы и обрушения, кДж.

Все эти величины переменны во времени, они зависят от вида горючего материала, его количества, площади пожара и многих других параметров. Температуру пожара в помещении определяет  $Q_{\text{пг}}$ , т.к. продукты горения распределяются по всему помещению.

$Q_{\text{гор.мат}}$  – этот тепловой поток невелик, но очень опасен, сведение его к нулю приводит к локализации пожара и его тушению;

$Q_{\text{кон}}$  – тоже опасный тепловой поток, т.к. за счет нагрева конструкций резко снижается их прочность, происходит потеря их устойчивости и обрушение.

Тепло на пожаре выделяется непосредственно в зоне горения, распространяется конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью. Тепло, которое передается теплопроводностью, невелико и его не учитывают.

$Q_{\text{пг}}$  и  $Q_{\text{изл}}$  – не учитывают, т.к. тепло уходит за пределы помещения и на температуру пожара не влияет.

Тепло на пожаре выделяется непосредственно в зоне горения и распространяется из нее конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью. Тепло, передаваемое теплопроводностью, сравнительно невелико и, как правило, в расчетах не учитывается.

Тепло, передаваемое из зоны горения конвекцией при горении жидких горючих материалов в условиях внутреннего пожара, составляет 55 – 60 %, а при горении твердых горючих материалов, например, штабелей древесины, 60 – 70 % от общего количества тепла, выделяющегося на пожаре. Остальные 30 – 40 % тепла передаются из зоны горения излучением. Соотношение этих величин зависит не только от вида горючего, но и от стадии развития пожара, температуры окружающих предметов, оптической плотности среды, условий газообмена. Поскольку конвективные потоки направлены из зоны горения преимущественно вверх, то суммарные тепловые потоки по различным направлениям будут неравноценны. Знание величины и направления суммарных тепловых потоков позволит определить не только соответствующие зоны пожара, но и доминирующее направление, и интенсивность распространения пожара.

Из уравнения теплового баланса (3.4) получим выражение для приближенного расчета температуры пожара, исходя из следующих соображений: температура пожара обусловлена разностью:

$$Q_{\Pi} - (Q_{\text{пг.у}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{гор.мат}} + Q_{\text{изл}})$$

Величину тепловых потерь

$$Q_{\text{пг.у}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{гор.мат}} + Q_{\text{изл}}$$

для различных видов пожаров на разных стадиях их развития выразим как долю тепловых потерь от  $Q_{\Pi}$ , т.е.

$$Q_{\text{пг.у}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{гор.мат}} + Q_{\text{изл}} = mQ_{\Pi}$$

Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{пг.о}} + mQ_{\Pi} \quad (3.5)$$

Тепло, расходуемое на нагрев продуктов горения и воздуха, находящегося в помещении, можно определить из уравнения:

$$Q_{\text{пг.о}} = V_{\text{м.пр}} S_{\Pi} C_p [V_{\text{пг}} + V_{\text{в}}(\alpha - 1)] \cdot (t_{\Pi} + t_{\text{н}}) \quad (3.6)$$

где

$V_{\text{м.пр}}$  – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(мин·м<sup>2</sup>),

$S_{\Pi}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>,

$C_p$  – среднеобъемная теплоемкость продуктов горения и воздуха, кДж/кг·С,

$V_{\text{пг}}$  – объем продуктов горения, м<sup>3</sup>,

$V_{\text{в}}$  – объем воздуха в помещении, м<sup>3</sup>,

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха,

$t_{\Pi}$  – температура пожара, °С,

$t_{\text{н}}$  – начальная температура в помещении, °С.

Тогда

$$\beta V_{\text{м.пр}} Q_{\text{н}}^{\text{п}} S_{\Pi} = V_{\text{м.пр}} S_{\Pi} C_p [V_{\text{пг}} + V_{\text{в}}(\alpha - 1)] \cdot (t_{\Pi} + t_{\text{н}}) + m\beta V_{\text{м.пр}} Q_{\text{н}}^{\text{п}} S_{\Pi}$$

Откуда

$$t_{\Pi} = t_{\text{н}} + \frac{(1-m)\beta Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{C_p(V_{\text{пг}} + V_{\text{в}}(\alpha - 1))} \quad (3.7)$$

В этом выражении неизвестны  $C_p$  и  $m$ .

Если задаться условием, что  $C_p$  – это среднеобъемная удельная теплоемкость смеси газов, то  $t_{\text{н}}$  можно определить методом последовательных приближений. Кроме этого, расчетные значения температуры являются средними по площади и по сечению помещения, что соответствует равномерному полю температур по всему объему помещения. Однако в реальных пожарах распределение температуры неравномерно по объему и нестационарно по времени.

Максимальная температура пожара обычно выше среднеобъемной и бывает в зоне горения. По мере удаления от зоны горения температура снижается как за счет разбавления продуктов горения воздухом, так и за счет потерь тепла в окружающую среду.

Большое влияние на распределение температуры оказывает и интенсивность газообмена, и направленность конвективных газовых потоков. Например, в помещениях с большой интенсивностью газообмена и высокотемпературным режимом, несмотря на интенсивное тепловыделение и высокую температуру в верхней части помещения, в нижней из-за притока холодного воздуха и оттока продуктов горения возможно пребывание людей. Чем выше помещение, тем

резче перепад температур, а значит, средняя температура такого пожара невелика.

В помещениях с малой интенсивностью газообмена и низкотемпературным режимом горение происходит с большим недостатком воздуха. Но температура в таком помещении одинакова по всему объему и может быть высокой из-за слабого оттока продуктов горения. Это обстоятельство необходимо учитывать при тушении пожара и для обеспечения безопасности людей и эффективной работы личного состава.

В начальной стадии пожара горение развивается за счет того воздуха, который составляет свободный объем помещения. Если проемы закрыты, то газообмен с окружающей средой отсутствует. Если есть открытые проёмы, то в начальный момент площадь пожара мала, а интенсивность газообмена велика.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие факторы влияют на температуру внутреннего пожара?
2. Как температура пожара зависит от вида горючего материала?
3. Как температура пожара зависит от величины пожарной нагрузки?
4. Каким образом температура пожара зависит от притока воздуха в помещение, если площадь пола и величина пожарной нагрузки постоянны?
5. Как изменится температура пожара при увеличении отношения площади приточных проемов к площади пожара?
6. Опишите тепловой баланс при внутреннем пожаре.
7. Основные составляющие теплового баланса. Их изменение во время свободного развития пожара.

## РАЗДЕЛ 3.4 ПАРАМЕТРЫ ГАЗООБМЕНА НА ВНУТРЕННЕМ ПОЖАРЕ

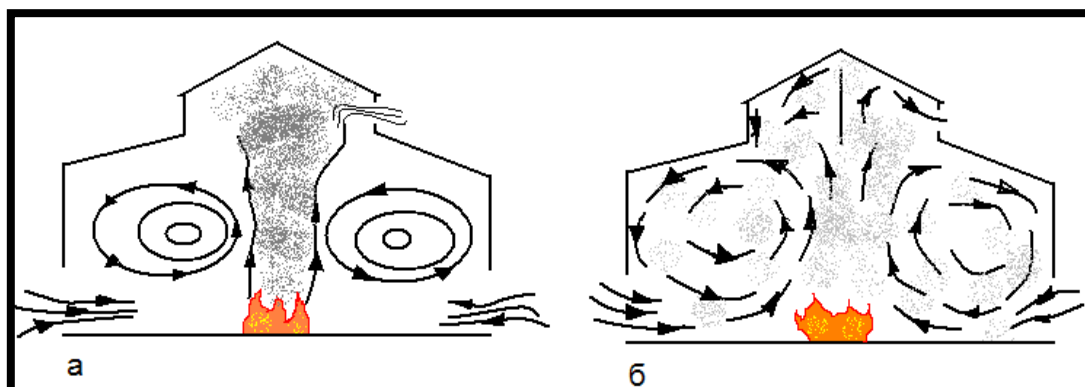
### 3.4.1 Возникновение и развитие газообмена при пожаре

Большое влияние на температурный режим пожара, на интенсивность его развития, скорость и направление распространения, уровень задымления оказывает газообмен. В объеме помещения создается непрерывная циркуляция газовых потоков, которые, с одной стороны, выравнивают температуру среды, а с другой, сами проявляют температурную неоднородность.

*Газообмен* – это движение конвективных газовых потоков, которые возникают за счет: наличия самого пожара; разности температур нагретых продуктов сгорания и окружающего воздуха; ветровых нагузков; принудительной вентиляции в помещении.

Движение холодного воздуха, поступающего в помещение, и дыма, который выходит из помещения, подчиняются законам гидродинамики.

Рассмотрим развитие пожара (рис. 3.4) с момента его возникновения. В начальной стадии горение происходит за счет воздуха, уже находящегося в помещении. Воздух, нагретый до высокой температуры в зоне горения, поднимается вверх, а к очагу пожара подтекают новые порции более холодного воздуха.



**Рис. 3.4.** Схема газовых потоков в помещении при пожаре:  
а – начальная стадия; б - развившийся режим

На ранней стадии такая тепловая струя затухает, не достигнув перекрытия помещения (рис. 3.4 а). При увеличении площади пожара мощность тепловой струи также увеличивается. Горячие газы и продукты горения вперемешку с холодным воздухом частично растекаются под перекрытием, частично удаляются через проемы. Часть охлажденного воздуха опускается вдоль стен вниз и попадает в зону химических реакций, нагревшись, снова поднимается вверх. В помещении создается непрерывная циркуляция газовых потоков (газообмен), температура постепенно возрастает. Поскольку объем нагретых газов больше объема холодных, то часть газов будет вытесняться. То есть масса газов будет постепенно уменьшаться по мере роста температуры. Взамен из окружающей атмосферы через проемы поступает свежий воздух (рис. 3.4 б).

На скорость движения воздуха оказывает влияние соотношение площадей приточных и вытяжных проемов и расстояние между их центрами по высоте.

Увеличение высоты расположения вытяжных проемов приводит к увеличению скорости газовых потоков, а, следовательно, и скорости распространения пламени и скорости выгорания. Известны случаи, когда при пожарах на сценах театров при открытии дымовых люков скорость воздуха достигала более 15 м/с, а пламя распространялось на покрытие на высоту 30 м за 2 – 3 мин.

Поэтому чтобы ограничить развитие пожара надо, прежде всего до минимума сократить площадь приточных проемов ( $S_1$ ), затем для снижения скорости притока воздуха и увеличения вытяжки дыма, следует площадь вытяжных отверстий ( $S_2$ ) привести в соответствие с площадью приточных, табл. 3.3.

**Таблица 3.3 Зависимость соотношения приточных и вытяжных проемов от высоты помещения**

Высота помещения, м	$S_1/S_2$
до 3	0.4 – 0.5
более 3	0.7 – 1.0

В таких случаях обеспечивается приток воздуха в помещение минимальный при высоте нейтральной зоны (НЗ) выше рабочей плоскости.

С уменьшением площади проемов помещения изменяются следующие параметры пожара:

- снижается скорость выгорания,
- снижается температура пожара,
- возрастает дымообразующая способность, т.е. снижается полнота горения,
- увеличивается продолжительность пожара.

Массовая скорость выгорания горючих материалов в условиях внутреннего пожара повышается с увеличением интенсивности газообмена, а затем некоторое время остается постоянной.

Зависимость абсолютного значения температуры от интенсивности газообмена имеет другой вид. Воздух, поступающий при газообмене в помещение, разделяется на две части. Одна часть воздуха активно поддерживает и интенсифицирует процесс горения, другая часть вовлекается в движение внутренними конвективными токами и в зону горения не поступает. Последняя будет разбавлять продукты горения в объеме помещения и тем самым снижать их температуру. Количество воздуха, не участвующего в процессе горения, учитывается коэффициентом избытка воздуха для объема данного помещения.

Сравнительным параметром газообмена на различных пожарах является интенсивность газообмена, под которой понимается количество воздуха, поступающего в единицу времени к единице площади пожара. По параметрам газообмена помещения классифицируются на четыре группы (табл. 3.4).

Таблица 3.4 Классификация помещений по параметрам газообмена

Группа помещений	Наименование	Высота	Интенсивность газообмена кг/(м <sup>2</sup> ·с)	S <sub>1</sub> /S <sub>пола</sub>
I	Подвалы, туннели, трюмы	менее 6 м	до 1,5	менее 1/12
II	Кинотеатры, здания без естественного освещения, башни, вертикальные шахты.	более 6 м	до 3,0	менее 1/12
III	Жилье, общественные и производственные здания.	менее 6 м	до 3,5	более 1/12
IV	Выставочные павильоны, цирки, вокзалы, ангары, сцены театров.	более 6 м	до 6	более 1/12

Особенностью горения в помещениях с  $S_1/S_{\text{пола}}$  менее 1/12 (I и II) является ограниченный приток воздуха, медленное выделение тепла с большим количеством продуктов неполного сгорания. Температура и концентрация дыма по высоте изменяются мало.

Опасность дыма на внутреннем пожаре характеризуется тремя параметрами:

- содержанием токсичных продуктов,
- наличием твердой фазы, снижающей видимость,
- высокой температурой.

К токсичным продуктам относятся: окись углерода (CO), хлористый водород (HCl), окиси азота, сернистый газ, сероводород, синильная кислота, фосген. Концентрация и состав токсичных продуктов в дыме на пожаре зависит от состава пожарной нагрузки, условий горения, интенсивности газообмена и количества этих продуктов, выделяющихся с 1 м<sup>2</sup> в единицу времени.

О влиянии интенсивности газообмена на плотность дыма можно судить данным табл. 3.5, где показана концентрация отдельных компонентов при горении однородной пожарной нагрузки в зданиях различных групп.

Таблица 3.5. Концентрация компонентов дыма при горении однородной пожарной нагрузки

Группа	Состав дыма,		
	СО	СО <sub>2</sub>	% объем. О <sub>2</sub>
I - II	0,15-1,5	0,8-8,5	10,6-19
III - IV	0.1-0.6	0.3-4.0	16-20.2

В помещениях с затрудненным газообменом (I-II) дым содержит значительно большее количество токсичной окиси углерода и наименьшее количество кислорода. Малый процент кислорода представляет опасность, поскольку при 14-16% наступает кислородное голодание, а при 9% создается опасность для жизни. В помещениях I-II групп часто содержание кислорода опускается ниже этого уровня. Наличие опасных для жизни продуктов и низкое содержа-



ние кислорода обуславливает необходимость защиты органов дыхания за счет применения кислородно-изолирующих противогазов.

Высокая температура в сочетании с высокой влажностью особенно в начальный момент тушения создают тяжелые условия для работы на пожаре.

Большим препятствием для эффективной работы пожарных при спасении людей и тушении являются твердые частицы, находящиеся в виде аэрозвеси которые снижают видимость в зоне задымления. Особенно плотное задымление образуется при горении веществ с высоким коэффициентом химического недожога (нефть и ее тяжелые продукты, резина, хлопок, шерсть, большинство пластмасс) в помещениях с ограниченным газообменом.

Плотность дыма определяется по количеству твердых частиц, содержащихся в единице его объема ( $\text{г/м}^3$ ) О плотности дыма судят по видимости в нем предметов, освещенных лампой (табл. 3.6).

*Таблица 3.6. Зависимость видимости о плотности дыма*

Вид дыма	Плотность, $\text{г/м}^3$	Видимость, м
Плотный	$f > 1.5$	до 3
Средней плотности	0.6-1.5	3-6
Слабой плотности	0.1-0.6	6-12

Для практических расчетов пользуются понятием дымообразующей способности, под которым понимается объем дыма, образующийся с единицы площади пожара в единицу времени ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ). Экспериментальные данные и опыт тушения пожаров показывают, что при слабой вентиляции опасные для жизни концентрации токсичных газов и большая степень задымленности создаются в течение первых минут. Надо отметить, что дверные проемы, межэтажные пустоты, вентиляционные шахты не обеспечивают защиту от задымления даже на минимальный промежуток времени. Огромное значение на процесс задымления зданий и сооружений оказывает работа различных вытяжных установок. Приточная вентиляция в помещение, где происходит горение, значительно ускоряет его задымление, увеличивает интенсивность горения, повышает задымленность соседних помещений. Наоборот, подача воздуха в смежные с горящим помещением препятствует их задымлению и может даже исключить вообще проникновение дыма. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из горящего помещения снижает задымленность, плотность дыма, но способствует развитию пожара. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из соседних с горящим помещением способствует его задымлению.

### **3.4.2 Факторы, влияющие на время наступления полного охвата помещения пламенем**

Во время начального этапа пожара, предшествующего полному охвату помещения пламенем, пожар развивается от места его зарождения, причем процесс горения первоначально проходит так, как это имеет место на открытом ме-

сте, но постепенно на ход этого процесса все больше и больше начинает влиять обратный тепловой поток, исходящий из верхних областей помещения. Увеличение интенсивности лучистого теплового потока, действующего на нижние области помещения, в конце концов, вызывают быстрое распространение пламени по всем воспламеняющимся поверхностям, и как только это случится, принято считать, что наступил полный охват помещения пламенем.

Длительность начального этапа пожара до полного охвата помещения пламенем обуславливает обеспечение безопасности людей, поэтому существенное внимание должно уделяться параметрам горючих веществ и материалов и условиям вентиляции, которые влияют на скорость нарастания опасных факторов пожара.

Поэтому необходимо выделить основные факторы, влияющие на продолжительность первой стадии пожара.

*Расположение и размеры источника зажигания.* Расположение источника зажигания в центре, в отличие от расположения его у стены, сокращает время наступления объемной вспышки, так как площадь пожара нарастает быстрее. Подобное влияние оказывает увеличение площади источника зажигания.

*Высота очага пожара.* При высоком расположении очага пожара пламя быстрее достигает потолка, нагревая его. Это способствует более быстрому развитию пожара за счет облученности возгораемых материалов.

*Плотность размещения пожарной нагрузки.* Полный охват помещения пламенем происходит быстрее, если пожарная нагрузка размещена в ней достаточно равномерно, а расстояния между соседними предметами позволяют обеспечить непрерывное распространение пламени по площади помещения.

*Физические свойства материалов облицовки стен и потолка.* Хотя возгораемый облицовочный материал уменьшает время, необходимое для полного охвата помещения пламенем, но это не самая важная переменная. При полномасштабном пожаре в помещении при центральном расположении источника зажигания горючая облицовка стен не охватывается пламенем до тех пор, пока пламя пожара не коснется потолка.

Важно знать факторы взаимного влияния. Самым важным из таких факторов является взаимное влияние положения источника зажигания и характера облицовочного материала. Время полного охвата помещения пламенем резко уменьшается, если облицовочный материал является возгораемым и охватывается огнем в результате непосредственного зажигания от источника воспламенения, расположенного в углу. Аналогично этому имеет место взаимодействие, хотя менее ярко выраженное, между двумя другими переменными: между высотой очага и его средней плотностью.

Дополнительным фактором, влияющим на время перехода к полному охвату помещения пламенем, является тепловая инерция пола, потолка и стен помещения.

Однако нарастание пожара от первоначально загоревшегося предмета может произойти путем непосредственного распространения огня на соседние предметы. Скорость нарастания пожара частично увеличится, если пожар перекинется на вертикальные поверхности помещения или если существует конфи-

гурация, которая способствует сохранению тепла в окрестности горящих поверхностей, например при перекрестном тепловом излучении.

Примерами такой ситуации могут быть возгорание под кроватью, или в углу, или между двумя близко расположенными предметами мебели, такими, как кровать или гардероб. Важную роль могут играть и другие факторы: термопластики могут плавиться и течь, создавая пожары жидких продуктов, которые могут распространиться на другие возгораемые предметы. При определенных условиях загоревшиеся потолочные плиты, изготовленные из расширяющегося полистирола, могут расплавиться и потечь, образуя дождь из горящих капель расплавленного полимерного материала, падающих на поверхности, расположенные ниже. Эти явления вполне понятны, но количественную оценку дать им трудно.

После наступления полного охвата помещения пламенем внешние поверхности всех горючих предметов в нем, будут охвачены огнем, интенсивность тепловыделения будет нарастать, достигая максимума, что приведет к высоким температурам, которые могут достигать 1100°C. Высокие температуры будут поддерживаться до тех пор, пока интенсивность образования воспламеняемых летучих продуктов не начнет уменьшаться в результате истощения горючих веществ. Именно в этот период полностью развитого пожара может произойти обрушение элементов здания, обусловленное значительными термическими напряжениями. Обрушение элементов конструкций может вызвать местное или общее разрушение конструкции здания. Термин «разрушение» относится также к ограждениям помещения, и их разрушение означает возможность переброса пожара в соседние пространства путем проникновения в них пламени или мощных тепловых потоков. По этой причине обоснована концепция разделения здания на пожарные отсеки, разделенные обычными стенами или противопожарными перегородками, обладающими соответствующей огнестойкостью. Цель такого разделения – удержание пожара в пределах, позволяющих ликвидировать его прибывающими пожарными подразделениями.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Механизм газообмена при пожаре в помещении.
2. От каких факторов зависит скорость движения газовых потоков при пожаре
3. Назовите факторы, ведущие к полному охвату помещения пламенем.
4. Какие параметры характеризуют опасность дыма на внутреннем пожаре.
5. Какие допущения принимаются при рассмотрении основных закономерностей газообмена?
6. Как влияет на развитие внутреннего пожара уменьшение площади приточных проемов?

## РАЗДЕЛ 3.5. ГАЗООБМЕН ВНУТРЕННЕГО ПОЖАРА

### 3.5.1 Фактическая и требуемая интенсивности газообмена, коэффициент избытка воздуха

Газообмен при пожарах в зданиях характеризуется *коэффициентом избытка воздуха*, под которым понимают отношение фактического секундного массового расхода воздуха, поступающего в зону горения, к теоретически необходимому секундному массовому расходу воздуха для осуществления процесса горения:

$$\alpha = \frac{G_B^0}{G_B^{\Phi}} \quad (3.8)$$

*Требуемый секундный массовый расход воздуха*, необходимый для полного сгорания пожарной нагрузки при заданной площади пожара  $S_{\Pi}$  и установившейся удельной массовой скорости выгорания, можно рассчитать по формуле:

$$G_B^0 = v_M^{yD} S_{\Pi} V_B^0 \rho_B \quad (3.9)$$

где:

$v_M^{yD}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с),

$S_{\Pi}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;

$V_B^0$  – теоретический объём воздуха необходимый для горения, м<sup>3</sup>/кг;

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

*Секундный фактический расход воздуха*, поступающего в помещение, вычислим по формуле:

$$G_{\Phi} = \mu S_1 \omega \rho_B \quad (3.10)$$

где

$\mu$  – коэффициент расхода проема, зависящий от его формы ( $\mu = 0,6-0,7$ );

$v_e$  – скорость притока воздуха, м/с;

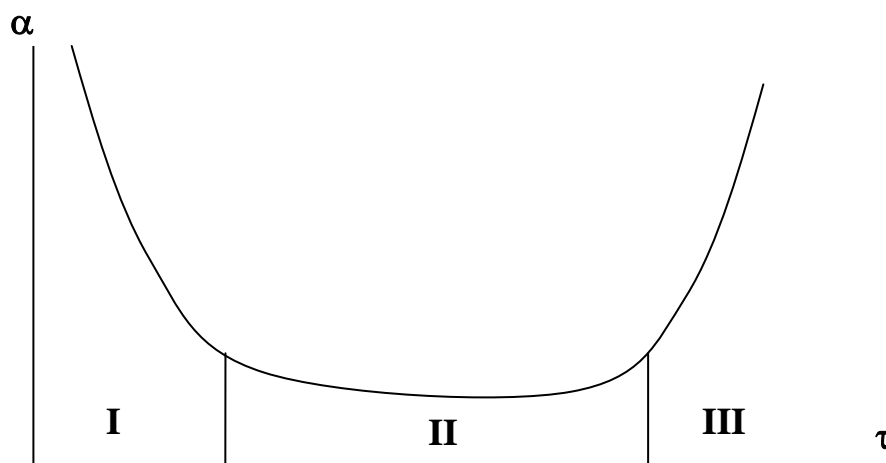
$S_1$  – общая площадь приточных проемов, м<sup>2</sup>.

Тогда для  $\alpha$  получим:

$$\alpha = \frac{\mu S_1 \omega}{V_{M,пр} S_{\Pi} V_B^0} \quad (3.11)$$

Скорость воздуха в приточном проеме  $v_l$  измеряется анемометром.

В течение первых нескольких минут  $\alpha$  резко уменьшается, в связи с расходом кислорода воздуха, находящегося в помещении. Последующий период характеризуется сравнительной стабильностью, т.к. устанавливается газообмен через проемы и неплотности. В последующем возможен рост  $\alpha$  или за счет уменьшения скорости выгорания материала, т.е. переход в режим тления, или в результате вскрытия дополнительных проемов (лопнули стекла) (рис. 3.5).



**Рис. 3.5.** Изменение коэффициента избытка воздуха в объеме помещения по времени пожара

Экспериментально установлено, что коэффициент избытка воздуха и скорость притока воздуха в помещение в основном определяются площадью проемов и значительно меньше зависят от температуры в помещении. Приняв это во внимание, надо отметить, что для постоянной площади проемов скорость выгорания ( $V_{м.пр.}$ ) является величиной относительно постоянной. Произведение ( $v_m \cdot S_n$ ) зависит от величины приведенной скорости выгорания и скорости распространения пламени, т.к. последняя в конечном итоге определяет площадь пожара  $S_n$ .

В экспериментах  $\alpha$  определяют по процентному содержанию кислорода в продуктах горения:

$$\alpha = \frac{21}{(21 - O_2)} \quad (3.12)$$

Количественной характеристикой газообмена на внутреннем пожаре является интенсивность газообмена. Интенсивность газообмена также подразделяют на *фактическую* и *требуемую*.

Фактическая интенсивность газообмена определяется соотношением:

$$I_{\Gamma}^{\phi} = \frac{\alpha v_B S_{пр} \rho_B}{S_{\Pi}} \quad (3.13)$$

Требуемая интенсивность газообмена определяется соотношением:

$$I_{\Gamma}^{тр} = \frac{G_B^0}{S_{\Pi}} = v_v V_B^0 \rho_B \quad (3.14)$$

Интенсивность газообмена влияет на скорость выгорания пожарной нагрузки, полноту ее сгорания, интенсивность дымообразования, скорость задымления помещения и др.

### 3.5.2 Плоскость равных давлений (нейтральная зона)

Поскольку внутренний пожар является нестационарным физико-химическим процессом, сделаем некоторые допущения:

- температура газов в помещении выше, чем температура окружающего воздуха, и с течением времени не меняется;
- ветровые нагрузки на здание отсутствуют;
- площади проемов с течением времени не изменяются;
- масса поступающих в помещение газов равна массе удаляемых газов

До пожара распределение давлений воздуха по высоте внутри и снаружи помещения, как правило, складывается так, что в верхней части давление больше, а в нижней части меньше атмосферного (рис. 3.6).

На некоторой высоте давление воздуха внутри равно давлению снаружи. На этом уровне располагается условная горизонтальная плоскость, которая называется *плоскостью равных давлений* (ПРД) или *нейтральной зоной*. Расстояние от ПРД до пола считается высотой нейтральной зоны и обозначается  $h_{\text{нз}}$ .

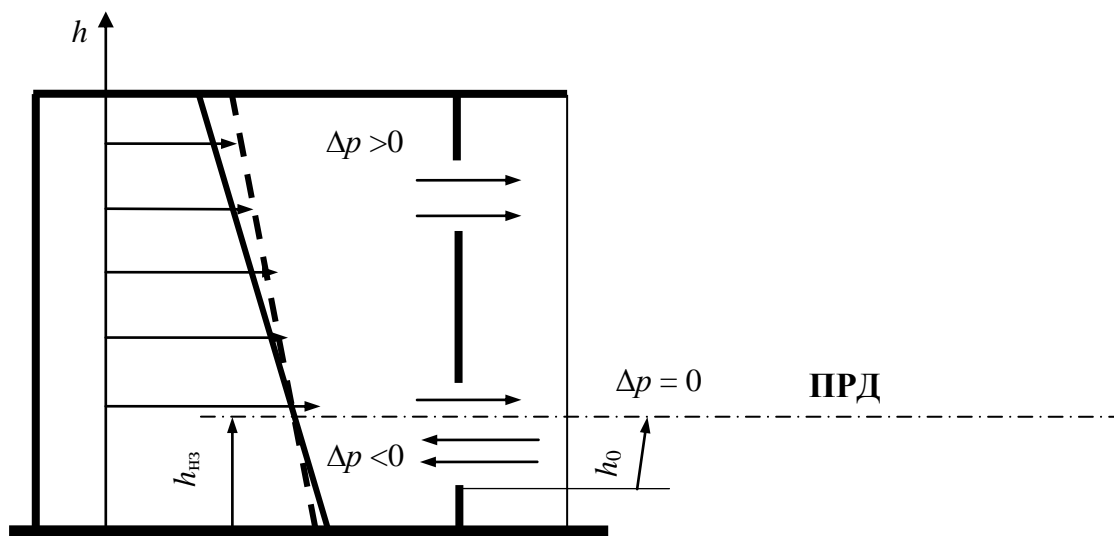


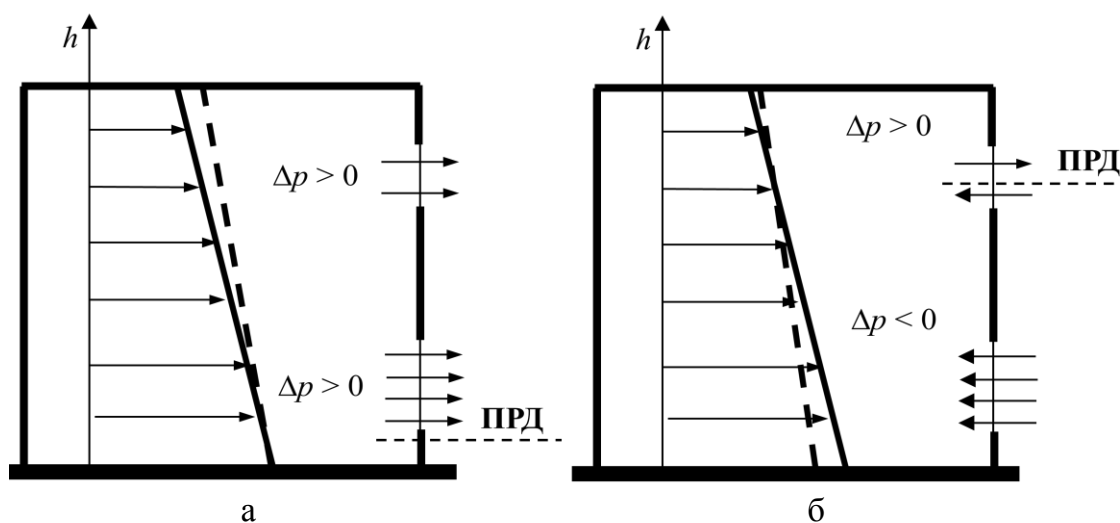
Рис. 3.6. Распределение давлений внутри и снаружи помещения

Через все отверстия, расположенные выше ПРД, воздух вытекает из помещения, ниже ПРД – поступает в помещение (см. рис. 3.5).

Появление очага горения в помещении сразу вызывает повышение давления газовой среды т.к. объем продуктов горения, даже при нормальных условиях, больше объема израсходованного воздуха. Среднеобъемная температура и, соответственно, плотность газовой среды в первый момент изменяются незначительно. В соответствии с выражением  $p = p_0 - \rho gh$  распределение давлений по высоте помещения также остается практически неизменным. В результате этого давление газов внутри помещения на всех уровнях возрастает на одну и ту же величину, эпюра давлений смещается практически параллельно, ПРД опускается. При этом, как правило, ПРД оказывается ниже нижней отметки проема и газы вытекают из помещения через все имеющиеся отверстия (откры-

тые проемы, щели и т.п.) независимо от их расположения (рис. 3.6). Процесс горения в такой ситуации развивается за счет запаса кислорода, имевшегося в помещении.

По мере развития процесса горения среднеобъемная температура повышается, плотность газовой среды уменьшается - эпюра давлений поворачивается. Одновременно с этим снижается концентрация кислорода в газовой среде, которая поступает в зону горения, в результате чего скорость выгорания уменьшается. Соответственно уменьшается скорость расширения газовой среды и давление внутри помещения начинает снижаться – эпюра давлений смещается влево, ПРД поднимается (см. рис. 3.7). Через проемы, расположенные ниже ПРД в помещение поступает воздух, выше – выталкивается образующаяся смесь газов, состав которой изменяется по мере развития процесса горения.



**Рис. 3.7.** Изменение положения ПРД при появлении и развитии очага горения

Если проемы расположены на разных уровнях (рис. 3.7 б), то высота нейтральной зоны определяется по формуле:

$$h_{\text{НЗ}} = \frac{1}{2} H_{\text{П}} + \frac{H}{\frac{\rho_{\text{В}} \sum S_{\text{ПР}}^2}{\rho_{\text{ПГ}} \sum S_{\text{ВЫГ}}^2} + 1} \quad (3.15)$$

где:

$h_{\text{НЗ}}$  – высота нейтральной зоны, м;

$H_{\text{П}}$  – высота приточного проема, м;

$H$  – расстояние между центрами приточных и вытяжных отверстий, м;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ПГ}}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>;

$S_{\text{пр}}$  – площадь приточных проемов, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{в}}$  – площадь вытяжных проемов, м<sup>2</sup>.

При газообмене через одно отверстие, например открытую дверь, окно или несколько отверстий, находящихся на одном уровне, процесс притока воздуха и выхода продуктов горения осуществляется через одно отверстие. На

приток работает только нижняя приблизительно третья часть отверстия (рис. 3.6 а).

Если воздухообмен осуществляется через отверстия, расположенные на одном уровне, нейтральная зона располагается непосредственно в плоскости этих отверстий. При этом выше нейтральной зоны продукты горения выходят наружу, а в нижней части отверстия происходит подсос воздуха внутрь помещения. В этом случае положение нейтральной зоны определяют по формуле:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H_{\text{пр}}}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{пг}}}}} \quad (3.16)$$

где:

$h_{\text{н.з}}$  – высота нейтральной зоны, м;

$H_{\text{пр}}$  – полная высота проема, через который осуществляется газообмен, м;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{пг}}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>.

При внутренних пожарах выделяется огромное количество дыма. Плотность дыма на пожарах в основном зависит от вида ТГМ и интенсивности газообмена. Увеличение концентрации дыма в зоне задымления происходит в результате разности количества выделяемого дыма в зоне горения, и количества дыма, удаляемого через проемы, где происходит пожар.

Количество дыма, выделяемого со всей площади пожара, можно определить по уравнению:

$$V_g^i = \varphi V_{\text{м.пр}} V_{\text{пг}} S_{\text{п}} \frac{T_{\text{п}}}{T_0} \quad (3.17)$$

где:

$V_g^i$  – количество дыма, выделяемого с площади горения, м<sup>3</sup>/с;

$\varphi$  – коэффициент пропорциональности, принимаемый 1-1,2 (величина безразмерная);

$V_{\text{м.пр.}}$  – приведенная массовая скорость выгорания, кг/м<sup>2</sup> · с;

$V_{\text{пг}}$  – количество продуктов горения, выделяемое при сгорании 1 кг горючего, м<sup>3</sup>/кг;

$S_{\text{п}}$  – площадь пожара на определенный момент времени, м<sup>2</sup>;

$T_{\text{п}}$  – температура пожара в определенный момент времени, К;

$T_0$  – начальная температура, К.

Количество дыма, удаляемого из помещения (объем отходящих газов) определим по формуле:

$$V_{\text{уд}}^i = \mu S_{\text{выт}} \sqrt{2gh_{\text{выт}} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пг}}}{\rho_{\text{пг}}}} \quad (3.18)$$

где:

$V_{\text{уд}}^i$  – количества дыма, удаляемого из помещения, м<sup>3</sup>/с;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий расход воздуха через вытяжные проемы, принимается равным 0,65;

$S_{\text{в}} – площадь вытяжных проемов, м<sup>2</sup>;$

$g$  – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;



$h_{\text{выт.}}$  – расстояние от оси (центра) вытяжного отверстия до нейтральной зоны, м;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{пр}}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментальные данные и опыт тушения пожаров показывают, что при слабой вентиляции опасные для жизни концентрации токсичных газов и большая степень задымленности создаются в течение первых минут. Огромное значение на процесс задымления зданий и сооружений оказывает работа различных вытяжных установок.

Приточная вентиляция в помещении, где происходит горение, значительно ускоряет его задымление, увеличивает интенсивность горения, повышает задымленность соседних помещений. Наоборот, подача воздуха в смежные с горящим помещения препятствует их задымлению и может даже исключить вообще проникновение дыма. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из горящего помещения снижает задымленность, плотность дыма, но способствует развитию пожара. Забор воздуха вытяжной вентиляцией из помещений соседних с горящим способствует его задымлению.

При организации тушения пожара, а также для успешной эвакуации людей из зоны задымления необходимо проводить мероприятия по регулированию положения нейтральной зоны в помещении.

Анализ полученных зависимостей положения нейтральной зоны показывает, что положение нейтральной зоны будет тем выше, чем меньше давление продуктов горения и большее давление свежего воздуха, который поступает в помещение. Таким образом, основными направлениями регулирования газообмена при пожаре в ограждении могут быть:

1. Изменение соотношения между площадями нижних и верхних проемов, т.е. нейтральную зону можно «поднять» вверх с целью снижения задымленности и уменьшения температуры в нижней рабочей зоне при тушении пожаров. В помещениях с большой интенсивностью газообмена и высоким температурным режимом нейтральная зона располагается сравнительно высоко. Поток холодного воздуха велик, и в нижней части помещения возможно пребывание людей. В этих помещениях сравнительно быстро можно создать благоприятную для тушения обстановку: вскрыть или закрыть проемы, ввести в действие дымососы, работать стволами через проемы.

2. Снижение давления в верхней части горящего помещения, путем откачивания нагретых продуктов сгорания передвижными дымососами и использование систем принудительного удаления дыма и вентиляции помещений.

3. Повышение эффективности процесса вентиляции помещения за счет раскрытия вытяжных отверстий в зоне, где создается максимальная температура и давление продуктов горения. Для этого обычно раскрываются дымовые люки и фонари в верхней части помещения.

В некоторых случаях для выпуска дыма и снижения температуры проводят разборку перекрытий.

4. Снижение температуры и осаждение продуктов сгорания распыленными водными струями.

5. Повышение давления воздуха в нижней части помещения путем нагнетания воздуха в нижнюю часть помещения дымососами.

6. Изменение направления следование конвективных потоков путем устройства перемычек, преград для распространения дыма с помощью воздушно-механической пены, устройства противопожарных завес и других преград.

### 3.5.3 Влияние аэродинамических условий на скорость и направление распространения фронта пламени

При увеличении интенсивности газообмена, интенсивность накопления тепла газовой средой в помещении снижается и, соответственно, понижается температура пожара. Однако величина фактического массового расхода воздуха взаимосвязана с массовой скоростью выгорания  $v_m$ .

Экспериментально установлено, что при стационарном газообмене  $v_m$  зависит от  $S_{пр} \sqrt{H}$  (рис. 3.8).

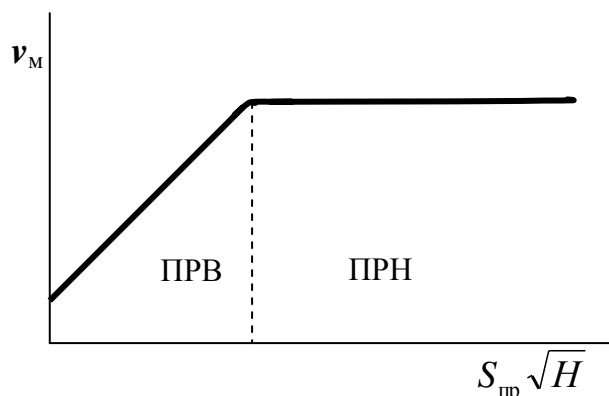


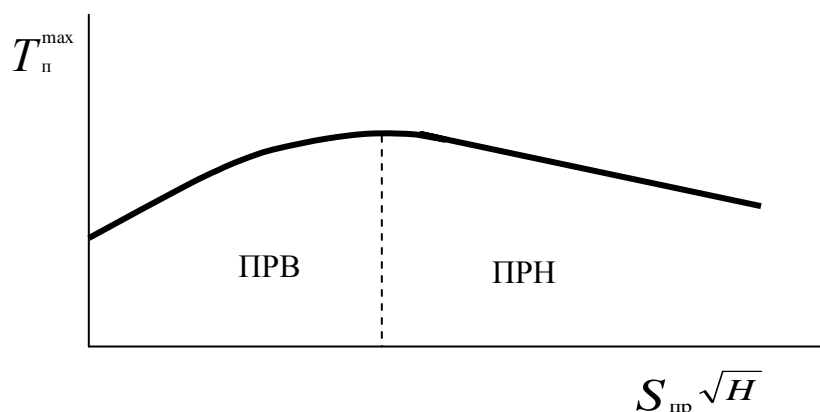
Рис. 3.8. Вид зависимости массовой скорости выгорания от проёмности помещения

Если при данной проёмности помещения скорость притока воздуха к поверхности горения не обеспечивает максимальную скорость выгорания, увеличение фактического расхода воздуха приводит к росту  $v_m$  и  $q_{п}$ . При этом  $q_{ср}$  становится больше нуля и  $T_{п}$  повышается. Такие *пожары* называются *регулируемыми вентиляцией (ПРВ)*. В тех случаях, когда массовая скорость выгорания и, следовательно, теплота пожара максимальны для данного горючего, при увеличении притока воздуха они не изменяются, т.е.  $q_{п}$  остается неизменной.

Однако, увеличение массового расхода газа, равно как и притока в помещение холодного воздуха, приводит к тому, что  $q_{ср}$  становится меньше нуля и  $T_{п}$  снижается. Такие *пожары* называются *регулируемыми нагрузкой (ПРН)*.

Таким образом, ПРН — это режим пожара, при котором массовая скорость выгорания определяется характеристиками пожарной нагрузки и не зависит от изменения притока воздуха в помещении, ПРВ - режим пожара, при котором

расход воздуха, поступающего в помещение, лимитирует массовую скорость выгорания (рис. 3.9).



**Рис. 3.9.** Вид зависимости максимальной температуры пожара от проёмности помещения

Как видно из рис. 3.9, в помещениях с различной проёмностью может устанавливаться одинаковая среднеобъемная температура. Однако обстановка на пожаре может существенно различаться. Как правило, пожары, регулируемые вентиляцией более опасны, чем пожары, регулируемые нагрузкой. Они протекают при недостатке воздуха. Поэтому горючие газы, выделяющиеся в результате пиролиза или испарения горючего материала, внутри помещения полностью не сгорают. Это приводит к увеличению объема пламени, выбрасываемого наружу через проем, что увеличивает опасность распространения пожара на верхние этажи здания. Следует отметить, что большую роль в этом играет форма проема - соотношение его ширины ( $B$ ) и высоты ( $H$ ).

Недостаток воздуха при ПРВ приводит к тому, что дым, проникающий в смежные помещения, также содержит продукты неполного сгорания и несгоревшие газы. Концентрация этих веществ за время свободного развития пожара может превысить верхний концентрационный предел распространения пламени. При вскрытии проема в такое помещение (например, для подачи ствола) происходит образование и воспламенение горючей смеси, сопровождающееся *выбросом пламени (объемной вспышкой)*.

Искусственное увеличение притока воздуха при ПРВ в первый момент, вызывает некоторое понижение среднеобъемной температуры газов. Однако, в дальнейшем, новый приток воздуха к поверхности горения приводит к росту массовой скорости выгорания и повышению температуры пожара. Как показали исследования ВНИИПО, в результате увеличения площади проема при ПРВ, температура пожара может возрасти в 2 раза. То же самое при ПРН может вызвать снижение  $T_{п}$  на 45%.

Таким образом, в зависимости от режима пожара, вмешательство в газообмен при его тушении может привести к прямо противоположным результатам, что является следствием взаимосвязи и взаимозависимости процессов горения, тепло- и газообмена.

Пожары в ограждениях в зависимости от объемно-планировочных решений подразделяют на открытые и закрытые.

*Открытые пожары* развиваются при наличии в помещении полностью или частично открытых отверстий. Горение быстро распространяется преимущественно в сторону открытых отверстий, через которые происходит газообмен с окружающей средой. Такие пожары по своим параметрам близки к пожарам на открытом пространстве. Газообмен через проемы оказывает влияние на развитие пожара в том случае, когда площадь пожара в 4–6 раз превышает площадь приточной части проемов. Если площадь пожара в 10 раз превышает площадь приточной части проемов, происходит резкое замедление процесса развития пожара.

К *закрытым пожарам* относят такие, которые протекают при закрытых отверстиях в ограждениях. Газообмен осуществляется через неплотности в ограждениях (щели в дверных проемах и оконных рамах, отключенная система вентиляции). При закрытых пожарах в течение первых нескольких минут коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  резко уменьшается в связи с расходом кислорода из воздуха, находящегося в помещении. Последующий период характеризуется сравнительной стабильностью, так как устанавливается газообмен через неплотности. В последующем возможен рост  $\alpha$  за счет уменьшения скорости выгорания материала, т. е. переход в режим тления, или в результате вскрытия дополнительных проемов (лопнули стекла, прогорели двери).

Из всего сказанного следует, что газообмен является основным фактором в развитии пожаров внутри зданий, так как он определяет скорость выгорания и скорость распространения горения (площадь пожара), скорость движения газов и абсолютные значения температуры в помещении. В то же время газообмен зависит от площади проемов и их расположения, температуры пожара. При тушении пожаров надо учитывать эту взаимную зависимость, чтобы не вызвать нежелательные последствия. Например, иногда на пожарах в целях удаления дыма и ввода стволов открывают все имеющиеся проемы. Это приводит к интенсивному развитию пожара, а сил и средств, чтобы его сдерживать, уже оказывается недостаточно.

Невозможностью развития пожара при отсутствии газообмена с окружающей средой пользуются иногда при пассивном методе тушения (пожар в трюме корабля).

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что такое коэффициент избытка воздуха? Как он изменяется во время пожара?
2. Механизм формирования плоскости равных давлений. Изменение ее высоты во время пожара.
3. Чему равно давление в нейтральной зоне?
4. Как определяется положение нейтральной зоны при внутренних пожарах?
5. В чем отличие при расчете положения нейтральной зоны на пожаре в помещениях с проемами, расположенными на одном уровне и на разных

- уровнях?
6. Какими приемами можно «поднять» уровень плоскости равных давлений на пожаре?
  7. В чем особенности пожаров, регулируемых вентиляцией?
  8. Охарактеризуйте особенности пожаров, регулируемых пожарной нагрузкой.
  9. Влияние параметра вентиляции на максимальную температуру внутреннего пожара.
  10. Влияние параметра вентиляции на массовую скорость выгорания пожарной нагрузки.
  11. Объемная вспышка при пожарах в открытых и закрытых помещениях. Ее механизм; условия, при которых она происходит.

## ГЛАВА 4. ПРЕКРАЩЕНИЕ ГОРЕНИЯ НА ПОЖАРЕ

### РАЗДЕЛ 4.1. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГОРЕНИИ

#### 4.1.1 Тепловая теория потухания

Тушение пожара представляет собой комплекс управленческих решений, направленных на обеспечение безопасности людей, животных, спасение материальных ценностей и ликвидацию горения.

Поэтому работа на пожаре ведется сразу по нескольким направлениям: спасание людей, сохранение материальных ценностей, развертывание сил и средств, вскрытие и разборка конструкций и собственно прекращение горения. В рамках изучаемой дисциплины будет рассмотрена только одна составляющая тушения пожара – это прекращение горения, общие принципы, пути и способы достижения этой цели. Важность изучения этих вопросов обусловлена тем, что основным процессом на пожаре является процесс горения. Нет процесса горения – нет и пожара.

И, с физической точки зрения, прекращение горения во всех его видах означает ликвидацию пожара.

При рассмотрении вопросов, связанных с возникновением и прекращением горения используют понятие классического «треугольника горения». Его суть сводится к тому, что процесс горения возникает лишь при наличии трех условий: горючее вещество, источник зажигания и окислитель (рис. 4.1). Если разорвать любую связь или исключить один из элементов данной схемы горение станет невозможным.



Рис. 4.1. Схема «треугольника горения»

Пламенное горение на пожаре является гомогенным и диффузионным. При этом газообразное горючее, непрерывно поступающее в зону горения, смешивается с газообразным окислителем и воспламеняется от источника зажигания. На пожаре таким непрерывно действующим источником зажигания является само пламя. Следовательно, ликвидация факела пламени означает исключение из треугольника пожара одного угла – источника зажигания и является условием необходимым для прекращения горения. Однако выполнение толь-

ко этого условия не всегда достаточно для тушения пожара. Так, при горении многих твердых, склонных к тлению материалов (древесностружечных плит, древесины, тканей, органических волокон и т.д.) температура поверхности составляет  $600\div 700^{\circ}\text{C}$ , что вполне достаточно для зажигания выделяющихся газообразных продуктов пиролиза и в отсутствие пламени. В таких случаях достаточным условием для тушения пожара является прекращение поступления горючих газов в зону горения, т.е. ликвидация еще одного угла треугольника пожара – горючего вещества.

Наиболее распространенной и наиболее научно обоснованной теорией прекращения процессов горения является *тепловая теория потухания* пламени, разработанная советским ученым Я.Б. Зельдовичем. Суть теории сводится к тому, что в результате нарушения теплового равновесия в зоне химических реакций горения при определенных условиях самопроизвольное и непрерывное протекание этих реакций становится невозможным и процесс горения прекращается. Это происходит тогда, когда температура в зоне горения снижается до некоторого критического значения, которое мы будем в дальнейшем называть *температурой потухания*:

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{ад}} - \Delta T$$

где

$T_{\text{ад}}$  – адиабатическая температура горения, К.

Следовательно, согласно тепловой теории прекращения горения, задача тушения пожара сводится к снижению температуры в зоне химической реакции до некоторого критического значения путем нарушения теплового равновесия системы. Это можно осуществить либо за счет снижения интенсивности тепловыделения химической реакции, либо повышения интенсивности теплоотвода, либо путем одновременного снижения тепловыделения и повышения теплоотвода.

Добиться снижения температуры можно любыми способами, в том числе:

- 1) Изменением соотношения компонентов, т.е. горючего и окислителя.
- 2) Разбавлением зоны горения нейтральными газами.
- 3) Введением ингибиторов.
- 4) Снижением давления.
- 5) Механическим срывом пламени и т.д.

В практике реализуется не один какой-то способ снижения температуры, а совокупность их действий. Например, применение тонкораспыленной воды: происходит фазовое превращение из жидкого в парообразное состояние, сопровождающееся поглощением тепла, затем горючая смесь разбавляется парами воды, и температура в зоне горения снижается.

#### 4.1.2 Условия необходимые и достаточные для прекращения горения

Ранее при изучении дисциплины «Теория горения и взрыва» было показано, что процесс пламенного горения может протекать только при определенных условиях:

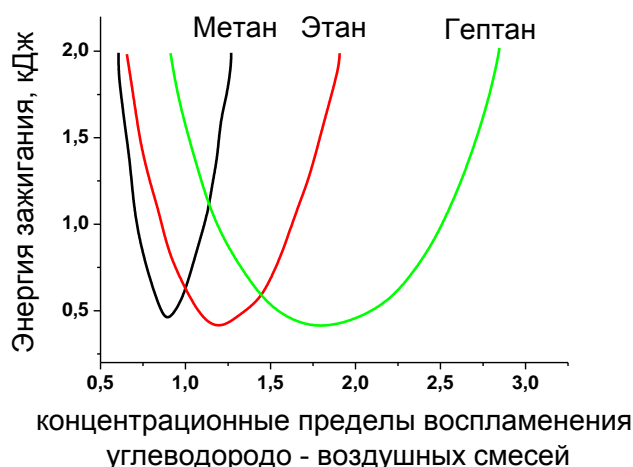
– в рамках концентрационных пределов воспламенения и распростране-

ния пламени и производных от них параметров,

- в рамках температурных пределов воспламенения горючих жидкостей и твердых горючих материалов,
- в рамках пределов по давлению и критических значений энергии зажигания;
- в рамках предельных скоростей распространения процессов горения;
- в рамках предельных значений температур зоны горения и многих других

**Концентрационные пределы в горении.** Численные значения концентрационных пределов воспламенения некоторых углеводородов приведены на рис. 4.2.

На границах этих пределов минимальные энергии, необходимые для воспламенения смеси данного состава, так резко возрастают, что оно становится практически невозможным. Если концентрационный состав горючей смеси изменяется в процессе ее поступления в зону горения, то энергии, поступающей к свежей горючей смеси от фронта пламени, станет недостаточно для поддержания непрерывного воспламенения новых порций горючей смеси и процесс горения прекратится.



**Рис 4.2.** Энергия зажигания как показатель концентрационных пределов воспламенения углеводородо - воздушных смесей

Концентрационные пределы распространения пламени по газо- и паровоздушным смесям, как правило, совпадают с концентрационными пределами их воспламенения. Вне этих пределов пламя не распространяется, т. е. затухает. Более точные исследования последних лет показали, что в условиях земного тяготения, за счет влияния сил естественной конвекции на процессы тепло- и массопередачи при горении, концентрационные пределы распространения пламени могут несколько не совпадать с концентрационными пределами воспламенения газовых смесей, особенно в сосудах и резервуарах больших объемов (газгольдерах, крупных резервуарах, больших помещениях и пр.). В этом случае концентрационные пределы распространения пламени зависят от места расположения источника зажигания.

К концентрационным пределам воспламенения и распространения про-



цессов горения относят также и *предельные концентрации нейтральных разбавителей* (или инертных газов), добавляемые в газозвушные смеси для их флегматизации. Численные значения предельных концентраций этих разбавителей зависят от вида горючего, режима горения, давления и др. Примерные численные значения предельных объемных концентраций нейтральных разбавителей представлены в табл. 4.1:

Таблица 4.1. Объемные концентрации нейтральных разбавителей

Название вещества	Химическая формула	Концентрация, об. %
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	25 – 30
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	30 – 35
Азот	N <sub>2</sub>	35 – 40
Аргон	Ar	50 – 55

При содержании в газовых смесях концентраций нейтральных разбавителей, больше указанных в таблице, горение прекращается.

Одним из условий диффузионного горения является то, что кислород воздуха должен поступать в зону горения в количестве, достаточном для образования горючей смеси. Если концентрация кислорода в окружающей атмосфере снизится, то горение станет невозможным. Для большинства горючих углеводородов предельная концентрация по кислороду составляет порядка 10 – 15 об.%.

**Предельные энергии и температуры зажигания.** Критические значения допустимых энергий электрической искры, безопасных по воспламенению горючих газо- и паровоздушных смесей углеводородов порядка 0,1 мДж, а для водородовоздушных смесей примерно в 10 раз меньше – 0,01 мДж.

Критические (предельные) энергии зажигания зависят не только от вида горючего и концентрационного состава смеси, но также от теплофизических свойств горючих смесей, давления и других факторов.

**Предельные значения температур самовоспламенения** горючих газо- и паровоздушных смесей зависят также от вида горючего, давления и других факторов. Минимальная температура самовоспламенения углеводородов парафинового ряда ~ 200°C. **Температура самовозгорания** ТГМ в атмосфере воздуха еще больше зависит от условий тепло, массо- и газообмена в системе горючее-окислитель. Она зависит от вида горючего материала, его дисперсности, влажности, пористости, плотности укладки, геометрических размеров системы, условий вентиляции и пр. Знание критических параметров воспламенения и зажигания горючих систем имеет огромное значение для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

**Пределы горения по давлению.** Пределы воспламенения и горения по давлению очень широки. Абсолютный предел по воспламенению наиболее реакционноспособной водородно-кислородной смеси стехиометрического состава, полученный экспериментально, близок к 665 – 920 Па, т.е. 0,01 атм. При меньшем давлении воспламенение практически невозможно, так как не-

обходимые энергии зажигания возрастают в десятки тысяч раз. Большинство углеводородо-воздушных смесей трудновоспламенимы уже при давлении в 0,1 атм., а интенсивность свободного диффузионного горения резко снижается (почти до пределов самопроизвольного распространения) уже при давлении 0,5 атм.

**Предельные скорости распространения горения.** С точки зрения динамики развития пожара наибольший интерес представляют пределы по скорости распространения процессов горения и массовой скорости выгорания.

Верхних предельных значений скорости распространения пламени по газоздушным смесям почти не существует. Они изменяются от 0,4 до 2,5 м/с для нормальных ламинарных пламен и в зависимости от газодинамического режима горения могут достигать до 50 – 100 м/с. Затем они могут перейти в интенсивные турбулентные пламена, а далее, в длинных каналах, трубах, или на местных турбулизаторах разгоняются до скоростей звука, порядка 300 – 400 м/с, после чего переходят в режим детонационного горения, со скоростью в 2 – 3 км/с. Нижнее значение скорости распространения пламени по газоздушным смесям ограничено более определенной величиной порядка 0,02 – 0,04 м/с.

Скорости распространения процессов горения по поверхности жидких и твердых горючих материалов (температура которых значительно ниже температуры их воспламенения) еще меньше. Они зависят от вида горючего материала, его состояния (дисперсности для ТГМ), внешних условий процесса горения (направления распространения пламени для ТГМ) и других факторов. Нижнее значение этой скорости может быть близко к нулю (случай не распространяющихся пламен), а верхнее ограничено величиной нескольких сантиметров в секунду до 10 – 15 м/с.

Массовые скорости выгорания твердых и жидких горючих веществ также зависят от вида горючего и условий горения. Для жидкостей верхний предел массовой скорости выгорания редко бывает выше 0,05 – 0,1 кг/(м<sup>2</sup> с), для твердых горючих материалов он ограничен величиной 0,015 – 0,02 кг/(м<sup>2</sup> с). Нижний предел массовой скорости выгорания практически одинаков и для горючих жидкостей, и для твердых горючих материалов; его численное значение примерно равно 0,003 – 0,005 кг/(м<sup>2</sup> с).

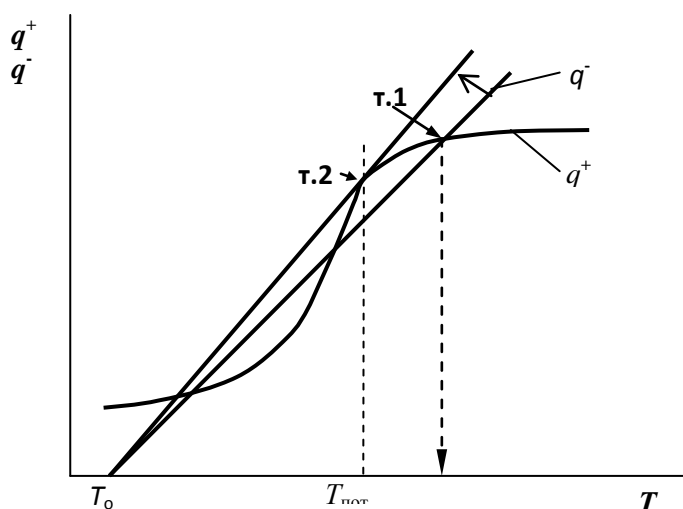
**Пределы по теплоте сгорания.** Нижнее предельное значение теплового эффекта от сгорания кубометра всех видов углеводородных горючих в смеси с воздухом численно равно примерно 1830 кДж/м<sup>3</sup>. При меньшей теплоте сгорания самопроизвольное продолжение процесса горения становится невозможным и горение прекращается.

**Температурные пределы в горении.** Теоретическое значение температуры пламени составляет приблизительно 2000 – 2500К в зависимости от вида горючего, состава горючей смеси и режима горения. При горении в условиях пожара за счет теплопотерь путем излучения из зоны горения и неполноты сгорания температура пламени редко превышает 1700 – 1800К. Температура зоны горения в условиях пожара в значительной степени зависит от вида горючего материала, его агрегатного состояния и условий тепло- и мас-

сообмена. Поэтому можно условно принять, что верхние температурные пределы на пожаре лежат в интервале 1600 – 1800К при горении горючих газов, 1500 – 1600К при горении горючих жидкостей и примерно 1400 – 1500К при горении твердых горючих материалов (кроме горения порохов и металлов типа магния, когда температура в зоне горения может быть и более 2500 К).

#### 4.1.3 Способы достижения температуры потухания

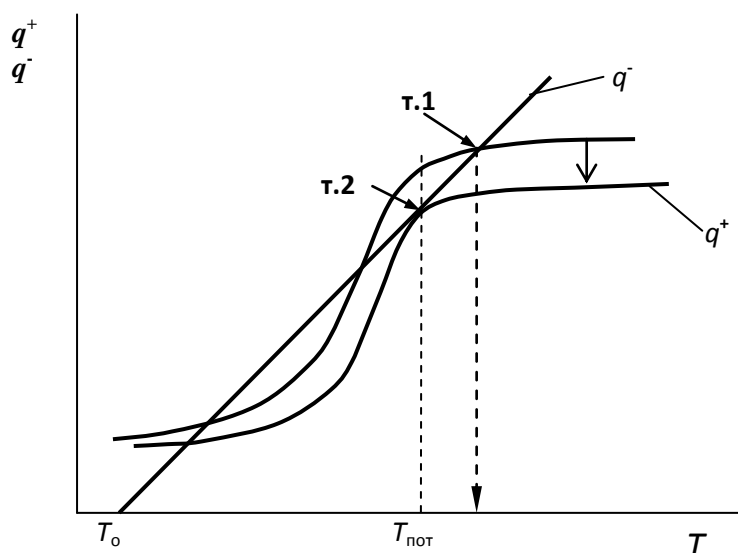
Для прекращения процесса горения недостаточно изменить только температуру, необходимо изменить параметры процессов тепловыделения и (или) теплоотвода. Например, изменим интенсивность теплоотвода из зоны горения путем увеличения коэффициента теплопередачи  $\alpha$  или отношения  $S/V$ . Графически это выразится в увеличении угла наклона прямой. Если степень изменения такова, что в итоге система перейдет в состояние, показанное на рис. 4.3, любое незначительное изменение температуры приведет к тому, что интенсивность теплоотвода станет больше интенсивности тепловыделения, т.е. процесс горения станет невозможным. Температура, соответствующая т. 2, и является температурой потухания.



**Рис. 4.3.** Схема достижения температуры потухания увеличением интенсивности теплоотвода в зоне горения

Перевести систему в состояние, характеризуемое т. 2, можно также путем воздействия на химическую реакцию горения, т.е. снижением интенсивности тепловыделения (рис. 4.4).

Следует отметить, что невозможно изменить интенсивность только одного из двух рассмотренных процессов, не затрагивая другой. При любом внешнем воздействии, например, при тушении пламени огнетушащими веществами, интенсивности обоих процессов меняются одновременно. Однако степень изменения зависит от преобладающего механизма действия конкретного огнетушащего вещества. Это позволяет при иллюстрации тепловой теории считать данные процессы независимыми друг от друга.



**Рис. 4.4.** Схема достижения температуры потухания уменьшением интенсивности тепловыделения в зоне горения

Таким образом, что все эти рассуждения дают чисто качественное представление о механизме тушения пламен, вполне достаточное для анализа различных способов прекращения горения на пожаре и механизмов действия различных огнетушащих веществ.

Рассмотрим на примерах основные механизмы прекращения горения путем нарушения теплового баланса в зоне горения, приводящего к снижению температуры до температуры потухания.

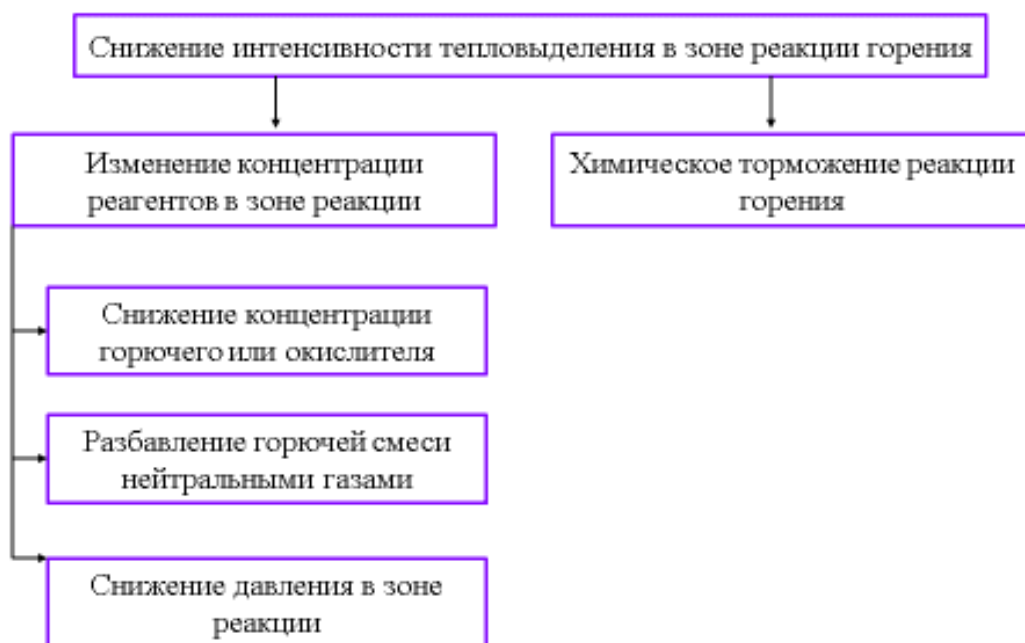
### **Способы снижения интенсивности тепловыделения**

На рисунке 4.5 представлены способы снижения интенсивности выделения тепла в зоне протекания реакции горения.

*1) Уменьшение концентрации горючего ( $\varphi_2$ ) в зоне горения.*

Один из распространенных способов тушения, реализующийся при использовании большинства огнетушащих веществ. Данный способ применим также в некоторых простейших ситуациях, например, перекрывание вентилях на трубопроводах горючего газа, закрывание емкостей с горючими жидкостями небольших размеров металлическим листом, накрывание очагов возгорания специальными огнезащитными одеялами и т.п.

Частным способом прекращения доступа горючего в зону горения, который осуществляется без применения огнетушащих веществ является тушение пожаров на резервуарах с горючей жидкостью методом ее перемешивания. Он сводится к следующему.



**Рис. 4.5.** Способы уменьшения интенсивности тепловыделения в зоне горения

Как известно, при горении жидкостей со свободной поверхности, горючее в зону горения поступает за счет испарения его из верхних, горячих слоев. В нижних слоях температура ниже, чем в поверхностном слое. Интенсивным механическим перемешиванием можно добиться того, что вопреки законам естественной конвекции, на поверхность поступят холодные нижние слои. По мере понижения температуры жидкости в поверхностном слое, концентрация горючего в зоне горения уменьшается, интенсивность тепловыделения  $q^+$  падает, снижается и температура пламени. В свою очередь это приводит к снижению интенсивности теплового потока от факела пламени к зеркалу жидкости. Это еще больше уменьшает интенсивность парообразования и приводит к дальнейшему разбавлению, обеднению горючим зоны реакции. Когда в результате всех этих взаимосвязанных процессов температура в зоне реакции понизится до температуры потухания, пламенное горение прекратится.

Возможно, тушение пламени и переобогащением горючей смеси в зоне реакции, т.е. более интенсивной подачей горючего в зону реакции горения. Но так как на пожарах, как правило, доступ окислителя в зону реакции горения очень велик и трудно регулируем, то увеличение интенсивности подачи горючего не приведет к переобогащению смеси и тушению пожара, а наоборот, интенсифицирует процесс горения за счет увеличения размеров факела пламени. Переобогащением возможно тушение пламени лишь в замкнутых объемах с сильно ограниченным доступом воздуха.

## 2) Уменьшение концентрации окислителя ( $\varphi_{ок}$ ) в зоне горения.

Этот способ пользуют в тех случаях, когда есть реальная практическая возможность снизить интенсивность подачи воздуха в зону горения, например, при тушении пожаров в подвалах, туннелях, шахтах, трюмах и т.п. Для этого используют как огнетушащие вещества (пены средней и высокой кратности),

так и специальные конструктивные решения (герметизация отсеков на подводных лодках и т.п.)

При обеднении зоны горения окислителем, интенсивность горения снижается и пламя гаснет. Это объясняется тем, что скорость реакции имеет максимальное значение лишь в области стехиометрических концентраций. Они уменьшаются как при обеднении, так и при обогащении смеси.

При достижении предельных значений на верхнем или нижнем пределе температура в зоне протекания реакции горения понижается до температуры потухания пламени и горение прекращается. Однако в некоторых случаях тушение переобогащением чревато объемной вспышкой (взрывом) т.к. при последующем обязательном вентилировании помещения концентрация горючих компонентов в смеси снова перемещается в область воспламенения.

### *3) Разбавление смеси путем введения нейтральных газов.*

Способ тушения пожара, объединяющий по своему механизму два предыдущих, так как в этом случае в зоне горения происходит снижение концентраций и горючего, и окислителя, что значительно снижает скорость тепловыделения и, в конечном счете, приводит к прекращению пламенного горения.

### *4) Торможение реакции путем введения химически активных ингибиторов.*

В этом случае резкое снижение скорости тепловыделения происходит вследствие взаимодействия ингибиторов с активными центрами самой реакции горения, что и приводит в дальнейшем к прекращению горения.

### *5) Снижением давления в зоне реакции.*

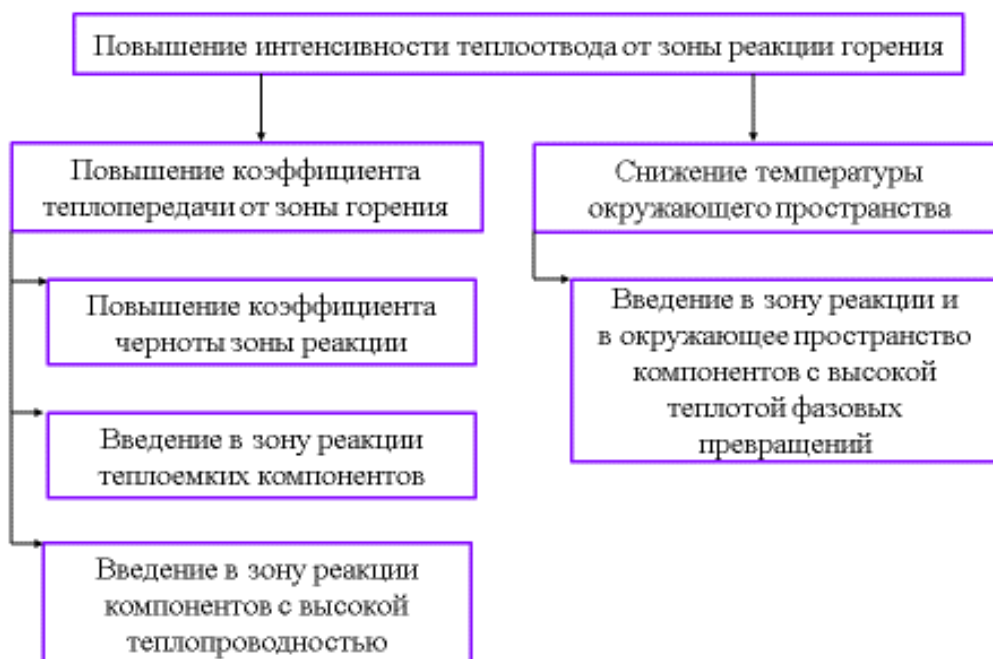
Данный механизм снижения тепловыделения практически не находит применения на практике, так как в большинстве случаев горение на пожарах протекает при давлении окружающей среды – близком к атмосферному, и повлиять на него мы не в силах. Однако в некоторых частных случаях он может быть осуществлен.

Физико-химический механизм этого способа проявляется в том, что скорость химической реакции, определяющая в реакциях горения интенсивность тепловыделения в зоне реакций, зависит от числа эффективных соударений молекул горючего с молекулами окислителя. А количество соударений прямо пропорционально количеству самих молекул в единице объема зоны реакции. А чем ниже давление, тем число молекул в единице объема газа меньше.

Таким способом можно прекратить горение в некоторых технологических установках и аппаратах, при пожарах в пилотских кабинах самолетов, в кабинах космических кораблей и на орбитальных станциях.

## **Способы повышения интенсивности теплоотвода**

На рисунке 4.6 изображены способы увеличения интенсивности отвода тепла от зоны протекания реакции горения.



**Рис. 4.6.** Способы интенсификации теплоотвода от зоны горения

1) *Увеличение коэффициента теплопередачи от зоны горения.* Этот механизм может быть реализовано путем:

- введения в зону горения теплоемких компонентов;
- введения в зону реакции веществ с большой теплотой фазового перехода.

Этот эффект находит достаточно широкое применение на практике. Простейшим примером является засыпание очага возгорания песком или землей. Тот же механизм реализуется при подаче в зону горения огнетушащих порошков и распыленной воды, которая как раз реализует значительный теплоотвод именно в момент испарения – фазового перехода из жидкости в пар.

2) *Увеличение удельной поверхности теплоотвода ( $S/V$ ).*

На практике этот механизм реализуется при введении в зону горения дисперсных веществ с большой удельной поверхностью, например, огнетушащих порошков. Аналогичным образом действуют и специальные технические устройства, такие как сетчатые огнепреградители, применяемые в технологических установках, при защите вентиляционных и технологических трубопроводов и т.д.

3) *Резкая интенсификация теплоотвода повышением коэффициента черноты излучающих сред в зоне реакции.*

В случае введения специальных добавок в пламя, которые повышают его излучающую способность, приведет к резкому увеличению интенсивности теплоотвода из зоны реакции и, как следствие, к быстрому прекращению процесса горения. Но данный механизм достаточно редко реализуем в реальных условиях пожара.

Единственный случай, когда этот способ реализуется на практике – это тушение пожаров металлов и их соединений специальными огнетушащими порошками (класса D) на основе порошкообразного графита. При этом сам графит

хоть и является горючим веществом, в полной мере реализует свою способность светиться в зоне высоких температур. Это повышает излучательную способность пламени и, соответственно, теплотери на излучение. Потери тепла в сочетании с охлаждающим действием самого порошка приводят в итоге к снижению температуры в зоне реакции горения до температуры потухания.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Опишите суть тепловой теории прекращения горения.
2. Температура потухания, пути и методы ее достижения.
3. Как называются те условия и параметры, за пределами которых процессы горения возникнуть или существовать не могут?
4. Каковы основные способы прекращения горения на пожаре путем увеличения интенсивности теплоотвода?
5. Каковы основные способы прекращения горения на пожаре путем снижения интенсивности тепловыделения?
6. Какие теплофизические характеристики и свойства веществ, введенных в зону горения, способствуют снижению в ней температуры?



## РАЗДЕЛ 4.2. ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА. ВОДА

### 4.2.1 Классификация огнетушащих веществ

Под *огнетушащими средствами* (ОС) понимают различные вещества и материалы, с помощью которых непосредственно создаются различные условия прекращения горения.

Все ОС классифицируются по двум признакам: *агрегатному состоянию* (рис. 4.7) и *механизму прекращения горения* (рис. 4.8).

Огнетушащие средства				
⇓	⇓	⇓	⇓	⇓
Жидкие (вода, водные растворы смачивателей и т.п.)	Пенные (воздушно-механические и химические)	Порошковые составы	Сыпучие материалы (песок, земля, флюсы, специальные составы).	Газообразные (нейтральные газы)

**Рис. 4.7.** Классификация огнетушащих средств по агрегатному состоянию

Огнетушащие средства			
⇓	⇓	⇓	⇓
Охлаждающие зону реакции или горячие вещества	Разбавляющие реагирующие вещества в зоне реакции горения	Химически тормозящие реакцию горения	Изолирующие реагирующие вещества от зоны горения
вода, раствор воды со смачивателем, твердый диоксид углерода и др.	водяной пар, инертные газы (CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Ar), дымовые газы, газодымные смеси, продукты взрыва ВВ, тонкораспыленная вода и др.	хладоны; огнетушащие порошковые составы, содержащие химически активные ингибиторы.	химическая и воздушно-механическая пена; огнетушащие порошковые составы; негорючие сыпучие вещества и материалы (песок, земля, шлаки, флюсы, графит), листовые материалы: покрывала, щиты и т.п.

**Рис. 4.8.** Классификация огнетушащих средств по механизму прекращения горения

Следует иметь в виду, что все огнетушащие составы оказывают комбинированное воздействие на процесс горения, при этом один из механизмов является преобладающим. Например, вода, может охлаждать и изолировать (или разбавлять) источник горения; порошковые составы оказывают изолирующее действие и тормозят реакцию горения; наиболее эффективные газовые составы разбавляют и тормозят реакцию горения и т. д. При выборе ОС в конкретных условиях пожара необходимо учитывать его доминирующее огнетушащее действие.

Помимо широко распространенных в природе естественных ОС (вода,

песок и др.) в настоящее время получают разнообразные искусственные. Однако не все ОС могут быть взяты на вооружение, а лишь те, которые в полной мере отвечают определенным требованиям:

- обладают высоким эффектом тушения при сравнительно малом расходе;
- доступны, просты в использовании и имеют низкую стоимость;
- не оказывают вредного воздействия при их применении на людей и материалы, являются экологически чистыми.

#### 4.2.2 Вода и водные растворы

Вода – это древнейшее и до сих пор самое распространенное вещество, используемое для тушения пожаров. По механизму прекращения горения вода относится к *охлаждающим средствам*. Но сам механизм прекращения горения зависит от условий и режима горения, вида горючего и его агрегатного состояния. С помощью воды можно выполнить условия необходимые и достаточные для прекращения горения веществ, находящихся в трех физических состояниях: газообразном, жидком и твердом.

Вода как огнетушащее средство обладает рядом достоинств и недостатков (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Классификация огнетушащих средств по механизму прекращения горения

Высокая температура замерзания воды ( $0^{\circ}\text{C}$ ) затрудняет ее применение при низких температурах, а малая вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения определяют плохие смачивающие свойства воды.

Большое поверхностное натяжение воды обусловлено тем, что на молекулы, которые находятся внутри жидкости, со всех сторон действуют одинаковые силы притяжения. Молекулы, которые находятся на поверхности, притягиваются лишь вовнутрь и, таким образом, вода стремится уменьшить свою поверхность, и капелька воды принимает форму шара. При добавлении *смачивателя* поверхностное натяжение уменьшается, капля теряет свою шарообразную форму, что приводит к увеличению проникающей способности воды и повышению ее огнетушащей эффективности. Например, при тушении деревянного

дома 1% добавка смачивателя позволяет уменьшить расход воды в пять раз и сократить продолжительность тушения.

Водные растворы смачивателей применяют для тушения пожаров горючих веществ, которые плохо смачиваются водой (уголь, пыль, резина, хлопок, кипы бумаг, древесная пыль и лесная почва).

К смачивателям относятся поверхностноактивные вещества (ПАВ): мыла, моющие средства. Эти средства адсорбируются на поверхности раздела фаз вода–воздух, снижая поверхностное натяжение воды. В качестве смачивателей применяются органические сульфаты, сульфонаты, высокомолекулярные органические азотсодержащие соединения, полиэферы, полиамиды. Однако смачивающие добавки способствуют коррозии, поэтому установки, которые длительное время находятся в контакте со смачивателями, должны иметь эффективную антикоррозийную защиту. Считается, что токсичность смачивателей, применяемых в пожаротушении, очень мала.

Одной из высокоэффективных добавок является фаерсорб, предназначенная для тушения пожаров класса А. Концентрат фаерсорб представляет собой дисперсный раствор полиакрилата натрия со стабилизирующими добавками – это гель, вязкое вещество, обладает хорошей адгезией к твердым материалам. При применении раствора фаерсорба на поверхности горящих материалов создается защитный слой, который состоит из 98 – 99 % воды, обладающей высоким охлаждающим эффектом. Так как слой геля фаерсорб не заполнен воздухом, то он не разрушается и не сносится потоками воздуха. Эта добавка задерживает молекулы воды, в результате снижается ее испарение. В пленке геля, которая образуется на поверхности, испарение происходит только со стороны пламени, а внутренний слой остается холодным. Использование этого геля в жилых помещениях и зданиях позволяет уменьшить ущерб от пролитой воды, т.к. удельный расход воды с добавкой в 1,2 – 4 раза меньше, чем чистой воды. Этот гель в 15 раз повышает охлаждающую способность воды, образует пленкозащитное покрытие на поверхности. Применение этой добавки эффективно и для тушения лесных пожаров.

#### **4.2.3 Механизм тушения водой**

Хорошая огнетушащая способность воды обуславливается следующими механизмами:

- охлаждающим действием;
- разбавлением горючей среды парами, образующимися при испарении;
- механическим воздействием на горящее вещество, т.е. срывом пламени.

Разбавляющее действие воды заключается в том, что при ее испарении объем образовавшегося пара в 1700 раз превышает объем испарившейся воды, что приводит к снижению содержания кислорода в окружающем воздухе. Однако объем водяного пара, образующегося при пламенном горении, невелик, поскольку вода контактирует с горящим материалом непродолжительное время и роль пара в прекращении горения незначительна. При горении твердых материалов основную роль в пожаротушении играет охлаждение поверхности.

В настоящее время при тушении пожаров используются два способа подачи воды – в виде *компактных* и *распыленных струй*.

*Компактная струя* из пожарного ствола представляет собой сплошной поток воды, имеющий высокую скорость. Эти струи имеют большой запас энергии и, вследствие этого, обладают определенной ударной силой, позволяющей срывать пламя. При этом большая масса воды воздействует на малую площадь. Данный способ тушения является наиболее простым и, потому, наиболее распространенным. В этом достоинство и, одновременно, недостаток компактных струй. Большой запас энергии позволяет подавать воду на большие расстояния, а сравнительно малая площадь воздействия снижает коэффициент использования. В результате материальный и экологический ущерб от тушения может превысить ущерб от самого пожара.

Этот способ подачи воды применяют при тушении газовых фонтанов (когда необходимо «поднять» нижнюю кромку факела пламени, т.е. увеличить «мертвую зону»), при тушении крупных развившихся пожаров штабелей древесины, т.к. при таком интенсивном горении распыленные струи не долетят не только к горящей древесине, но не попадут внутрь факела пламени. Они испарятся во внешних зонах факела пламени или унесутся вверх интенсивными газовыми потоками, практически не повлияв на процесс горения.

*Распыленная струя* – это поток воды, состоящий из отдельных капель. Такие струи обладают небольшой энергией и дальностью полета. Однако единица массы распыленной воды орошает большую площадь, чем такое же количество компактной. Кроме того, распыленная струя может активно воздействовать непосредственно на зону горения.

Распыленную воду применяют в основном при небольшой высоте пламени, когда можно подать её между пламенем и нагретой поверхностью, при тушении волокнистых веществ и материалов, пыли, темных нефтепродуктов, для снижения температуры в помещениях, для осаждения дыма, защиты от теплового излучения, для охлаждения нагретых поверхностей строительных конструкций сооружений, установок.

Несмотря на универсальность воды ее нельзя применять для тушения в следующих случаях:

1) для тушения горючих веществ и материалов, с которыми вода вступает в интенсивное химическое взаимодействие с выделением тепла и горючих компонентов;

2) для тушения пожаров с температурой выше 1800 – 2000°C, т.к. при этом пары воды диссоциируют с образованием водорода и кислорода, образовавшаяся смесь взрывается;

3) для тушения пожаров установок под высоким напряжением;

4) для тушения раскаленного железа и угля, которые реагируют с кислородом и из водяного пара выделяется водород, который образует гремучую смесь с воздухом;

5) для тушения горящих масел и жиров, особенно если применять компактную струю, тогда может произойти разбрызгивание или выброс;

б) для тушения жидкостей, у которых  $t_{кип} < 80$  °C.

Во всех остальных случаях вода является надежным, эффективным и поэтому наиболее широко используемым средством тушения пожаров.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Классификация огнетушащих веществ по доминирующему механизму действия на процесс горения.
2. По какому принципу осуществляется выбор огнетушащих веществ для тушения пожаров?
3. Назовите основные теплофизические параметры воды.
4. В каких случаях категорически нельзя применять воду для тушения пожара? Ответ обоснуйте.
5. В чем проявляется химическая активность воды?
6. В чем проявляется физическое взаимодействие воды с другими веществами?
7. В чем заключается механизм действия воды на процесс горения при ее подаче в зону горения?
8. Поясните механизм действия воды на процесс горения при ее подаче на поверхность горючего материала.

## РАЗДЕЛ 4.3. ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА. ПЕНЫ

### 4.3.1 Структура пен

Пена, как огнетушащее средство широко используется при тушении пожаров на объектах химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также используется для тушения твёрдых и жидких веществ, не вступающих во взаимодействие с водой.

Пена – это дисперсная двухфазная система, состоящая из ячеек, заполненных газом или паром и разделенных пленкой жидкости. Газ или пар, заполняющий ячейки, являются дисперсной фазой, а жидкость дисперсионной средой.

Отношение объёмов газовой ( $V_{г}$ ) и жидкой ( $V_{ж}$ ) фаз (в единице объёма) пены определяет её структуру и свойства. Если объём газовой фазы превышает объём жидкости не более чем в 10 – 20 раз, ячейки пены, заполненные газом, имеют сферическую форму. В таких пенах газовые пузыри окружены оболочками жидкости относительно большой толщины. Сферические пены отличаются высоким содержанием жидкости, а поэтому малой устойчивостью. Поэтому их относят к *метастабильным* (условно стабильным).

В *нестабильных* пенах жидкая фаза из перегородок удаляется, истекая под действием силы тяжести, и происходит слияние соприкасающихся газовых пузырьков. В пене, газовый пузырек не может свободно перемещаться ни в вертикальной, ни в горизонтальной плоскости. Он как бы «зажат» другими, прилегающими к нему пузырьками.

С увеличением отношения  $V_{г}/V_{ж}$  толщина плёнки жидкости, разделяющая газовые объёмы, уменьшается, а газовая полость утрачивает сферическую форму. Пены, у которых отношение  $V_{г}/V_{ж}$  составляет несколько десятков или даже сотен, имеют многогранную форму. Причём форма многогранников может быть различной – треугольные призмы, тетраэдры, неправильной формы параллелепипеды.

В процессе старения пены шарообразная форма ячеек переходит в многогранную. Многогранные пены отличаются малым содержанием жидкой фазы и характеризуются высокой стабильностью. В таких пенах отдельные пузырьки сближены и разделены тонкими «растянутыми пленками». Эти пленки, в силу упругости и ряда других факторов, препятствуют слиянию газовых пузырьков. По мере утончения разделительных пленок, пузырьки все плотнее сближаются, прилегают друг к другу и приобретают четкую форму многогранников.

### 4.3.2 Способы получения и параметры пен

По способу образования пены подразделяют на *химические* и *воздушно – механические*.

*Химическая пена* образуется при взаимодействии растворов кислот и щелочей в присутствии пенообразующего вещества и представляет собой концен-

трированную эмульсию диоксида углерода в водном растворе минеральных солей.

Для пожаротушения, чаще всего используют *воздушно-механические* пены. Их получают в результате дробления и распределения воздуха или газа в растворе с пенообразователем. Небольшие порции газа вводят в раствор и дробят их там до размеров мелких пузырьков. Легче всего этого добиться, продувая газ через трубку, опущенную в жидкость. Таким образом, могут быть получены монодисперсные пены (т.е. пены, состоящие из пузырьков одинакового размера). Можно получить пену пропуская воздух через жидкость; механическим перемешиванием, встряхиванием или взбиванием. Иногда орошают жидкостью металлическую сетку, через которую принудительно подают газ.

Для получения пен применяют в основном две группы устройств. К первой относятся *воздушно-пенные стволы*, работающие по принципу соударения струй. Раствор пенообразователя под давлением выбрасывается из отверстий, расположенных под углом друг к другу, вследствие чего струи сталкиваются, дробятся и перемешиваются, захватывая воздух из окружающей среды. Пена, образующаяся в результате интенсивного перемешивания раствора и воздуха, выбрасывается через конструкцию, называемую стволом. Такая пена характеризуется низкой кратностью (*кратность пены* – это отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого пена получена) и неоднородностью структуры, поэтому она нестойка. Однако такие генераторы даже при небольших давлениях выбрасывают струю пены на дальние расстояния, что облегчает тушение больших очагов пожара.

В *пеногенераторах* второй группы вспенивание происходит на сетках. Раствор пенообразователя под давлением выбрасывается из распылителя, попадает в виде капель на ячейки сетки и смачивает их. При получении пен средней кратности для формирования пузырьков используется поток воздуха, который приводится в движение струями раствора. Для получения пен высокой кратности воздух, как правило, подается принудительно вентилятором.

### 4.3.3 Параметры пен

С помощью одного и того же пенообразователя можно получить пену, обладающую различной огнетушащей эффективностью. Это зависит главным образом от её параметров, таких как кратность, дисперсность, стойкость, вязкость и др.

*Кратностью пены* ( $K_{п}$ ) называется отношение объема пены  $V_{п}$  к объёму раствора пенообразователя, из которого она получена  $V_{раст. ПО}$  :

$$K_{п} = \frac{V_{п}}{V_{раст. ПО}} \quad (4.1)$$

Это основная характеристика структуры пен. По данному показателю пены делятся на:

- а) *низкократные* –  $K_{п} = 4 - 20$ ,
- б) *среднекратные* –  $K_{п} = 21 - 200$ ,
- в) *высокократные* –  $K_{п}$  более 200.

Системы с кратностью менее 4 относятся к *пеноэмульсиям*. При прочих равных условиях, чем выше кратность пены, тем больше ее изолирующая способность и меньше охлаждающая.

Пены *низкой кратности* в основном используются для тушения разлитых нефтепродуктов, складов древесины и волокнистых материалов, так как она хорошо проникает в неплотности и удерживается на поверхности. Следует помнить, что вследствие высокой плотности существует вероятность погружения пены низкой кратности внутрь горючей жидкости.

Пеной *средней кратности* осуществляют тушение по площади и по объему. Она является основным средством тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах и на разлитых поверхностях. Она также используется для вытеснения дыма при объемном тушении, изоляции расположенных рядом с очагами пожара объектов от воздействия тепловых и газовых потоков. Но после применения пены в подвалах и тоннелях, шахтах и т.д. отдельные очаги горения необходимо ликвидировать водяными струями.

Пена *высокой кратности* применяется при объемном тушении для локализации пожара, снижения температуры, вытеснения дыма. Высокократная пена эффективно применяется для осаждения радиоактивных загрязнений из воздуха, тушения пожаров органических растворителей, тушения пожаров на кораблях, в библиотеках, архивах, шахтах и т. д. У пены высокой кратности имеются такие недостатки, как затрудненная подача на значительное расстояние; она легко сдувается ветром и восходящими потоками продуктов горения; быстро разрушается при контакте с сухими предметами и очень чувствительна к воздействию высоких температур; при ее использовании в закрытых помещениях должно быть предусмотрено отверстие для удаления воздуха и т.д.

*Дисперсность пены* ( $D_n$ ) обратно пропорциональна среднему диаметру пузырьков ( $d_{cp}$ ):

$$D_n = \frac{1}{d_{cp}} \quad (4.2)$$

Дисперсность пены характеризуется удельной поверхностью раздела фаз. Пены могут быть *высокодисперсными* и *низкодисперсными*. С увеличением кратности пены растет и средний диаметр пузырьков. При увеличении кратности толщина стенок уменьшается, поэтому растет средний диаметр. В процессе старения дисперсный состав изменяется, с течением времени *полидисперсность* увеличивается.

Кратность и дисперсность пены определяют изолирующую способность пены и ее текучесть. Скорость растекания пены, тоже важный фактор при тушении пожара.

*Стойкость пены* – это время существования (жизни) элемента пены (отдельного пузырька, пленка) или определенного ее объема.

Неустойчивость пены объясняется избытком поверхностной энергии пропорциональной поверхности раздела фаз «жидкость – газ», т.е. состояние равновесия будет тогда, когда пена превратится в жидкость и газ, т.е. пена, как и любая дисперсная система, является неустойчивой. Поэтому применительно к пенам можно говорить лишь об относительной стойкости.



По времени жизни пены разделяют на *короткоживущие* (флотационные), *долгоживущие* (пожарные, моющие) и *безграничноживущие* (твердые пены). Разрушение пены происходит в результате разрыва пленок внутри пены и истечения жидкости. В стойких пенах пленки не разрушаются в течение 10 – 20 минут. В пенах высокой кратности процесс истечения жидкости затруднен и разрушение обусловлено разрывом пленок. В пенах средней кратности процесс разрушения пены осуществляется в следующем порядке: истечение жидкости, что приводит к утончению пленок, и затем их разрыв. Истечение протекает следующим образом: раствор из ячеек стекает вниз, пропитывая нижележащие слои пены. Истечение закончится тогда, когда вся излишняя жидкость будет удалена. Скорость истечения и стойкость пены зависят от вязкости пенообразователя.

Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит в основном от температуры окружающей среды, дисперсности и толщины стенок пузырьков.

Толщина стенок пузырька –  $h_{п}$ , его диаметр –  $d_{п}$  и кратность пены –  $K_{п}$  связаны зависимостью:

$$\square_{ст} \sim \frac{d_{п}}{K_{п}} \quad (4.3)$$

Стойкость пены зависит также от высоты пенного слоя. При увеличении высоты слоя пены уменьшается выделение жидкой фазы, следовательно, стойкость пены увеличивается.

*Вязкость пены* влияет на текучесть пены, и оценивается коэффициентом динамической вязкости ( $\mu$ ). В отличие от жидкости пена обладает свойствами «твердого тела». Внешне это проявляется в способности пены сохранять определенное время свою первоначальную форму.

Вязкость зависит от природы пенообразователя, кратности, дисперсности коэффициента динамической вязкости. С увеличением кратности и дисперсности коэффициент динамической вязкости растет. В процессе старения вязкость пены сначала растет, а затем или уменьшается или остается постоянной. Чем скорость истечения жидкости меньше, тем выше вязкость пены.

*Теплопроводность пены.* Теплопроводность пены из-за наличия газа очень мала.

*Электропроводность пены.* Чем больше жидкости в пене, тем выше ее электропроводность. Следует помнить, что из-за хорошей электропроводности пенного раствора запрещено применять пены для тушения пожаров в электроустановках под напряжением.

*Условия пенообразования.* Чистые жидкости пен не образуют, т.к. обладают высоким коэффициентом поверхностного натяжения. Для того, чтобы снизить поверхностное натяжение, в жидкости вводят ПАВ – поверхностно активные вещества. При введении этих веществ образуется своеобразный поверхностный слой, в результате снижается поверхностное натяжение. ПАВ оцениваются по пенообразующей способности раствора, в состав которого они входят. *Пенообразующая способность* – это количество пены, которое образуется из объема раствора в течение определенного времени.

### 4.3.4 Механизм огнетушащего действия пен

Пены применяются для тушения как твердых, так и жидких горючих веществ. При этом пламенное горение прекращается в результате комплексного воздействия следующих основных механизмов.

*Изолирование зоны горения от поверхности горючего.* Он заключается в том, что слой пены, формируемый на поверхности, постепенно уменьшает поток горючего пара или газа в зону химических реакций. Это приводит к уменьшению концентрации горючего в ней и, соответственно, к понижению интенсивности тепловыделения и температуры пламени. Когда слой пены достигает определенной толщины (зависящей от вида пенообразователя и горючего) температура пламени снижается до температуры потухания.

*Охлаждение поверхности* выделяющимся отсеком. Действие этого процесса также приводит к уменьшению концентрации горючего в зоне горения, но за счет снижения массовой скорости выгорания материала.

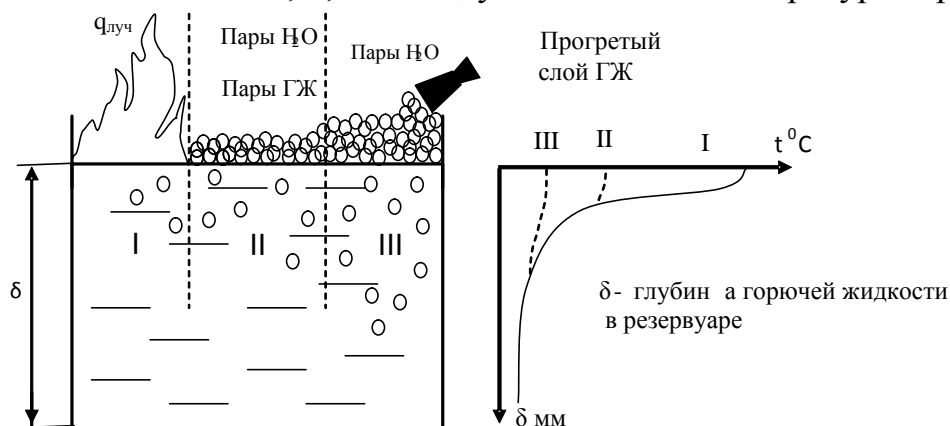
*Экранирование лучистого потока* от пламени к поверхности. Этот процесс, как и охлаждение, уменьшает скорость поступления горючих газов в зону химических реакций и, в конечном счете, температуру пламени.

*Разбавление зоны горения* водяным паром, образующимся при испарении отсека.

В настоящее время пены наиболее часто применяются для тушения жидкостей. При этом процесс формирования изолирующего слоя на поверхности жидкости протекает постепенно и носит комплексный характер (рис. 4.10).

Первоначально, если интенсивность подачи пены (подача объема пены на один квадратный метр площади в единицу времени) превышает интенсивность её разрушения, то на поверхности ГЖ образуется сразу локальный слой пены, который охлаждает ГЖ, выделяющимся из пены отсеком (жидкость, выделившаяся при разрушении пены).

Охлаждение прогретого слоя ГЖ отсеком пены приводит к тому, что уменьшается скорость испарения ГЖ, вследствие этого, уменьшается концентрация паров горючего в зоне горения, снижается скорость химической реакции и скорость тепловыделения, и, в итоге, уменьшается температура горения.



**Рис. 4.10.** Схема прекращения горения жидкости воздушно-механической пеной  
1 – участок свободного горения, 2 – участок активного воздействия пены на процесс горения, 3 – участок на котором горение прекращено

Как только образуется локальный слой пены на поверхности ГЖ, он экранирует часть ГЖ от лучистого потока пламени и охлаждает верхний прогретый слой. Уменьшается концентрация паров горючего в зоне горения, снижается скорость окисления, и снижается температура горения.

При достижении на поверхности жидкости слоя пены определённой толщины, прекращается поступление выделяющихся паров ГЖ в зону горения. Следовательно, пена изолирует горючую жидкость от зоны горения, и горение прекращается.

Пары воды, выделившейся из пены, при ее разрушении, попадают в зону горения, при этом они снижают концентрацию горючего в объеме зоны горения, а также охлаждают эту зону.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что собой представляет пена? Какова её структура?
2. Назовите основные причины (виды) разрушения пены.
3. Охарактеризуйте основные параметры пены.
4. Какую роль играет разрушение пены в процессе тушения горючих жидкостей?
5. В чем состоит механизм действия пен при тушении жидкостей.
6. В каких случаях нельзя применять водопенные средства?
7. От чего зависит устойчивость пены, нанесенной на горящую поверхность?

## РАЗДЕЛ 4.4. ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА. ПОРОШКИ

### 4.4.1 Классификация огнетушащих порошков

В последние годы в практике тушения пожаров все более широкое применение находят *порошковые огнетушащие составы* (ПОС). Это связано с тем, что порошковые составы могут применяться для тушения практически всех видов пожаров в различных отраслях промышленности и на транспорте.

Основные преимущества порошков следующие:

- они практически не повреждают имущество;
- способны тушить материалы, которые не тушатся или тушатся с трудом водой (резина, пластики);
- применимы для тушения электроустановок под напряжением (до 1000 В);
- способны быстро снижать среднеобъемную температуру в помещении.

Огнетушащие порошки классифицируют по очагам пожаров, для тушения которых тот или иной порошок предназначен. Современная классификация очагов пожаров приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Классификация очагов пожаров

Класс очага пожара	Вид горящих веществ и материалов
A	горение твёрдых веществ
<i>подкласс A1</i>	горение твёрдых веществ, сопровождаемое тлением (уголь, текстиль, древесина, целлюлозосодержащие материалы)
<i>подкласс A2</i>	горение твёрдых веществ, не сопровождаемое тлением (плавящиеся полимерные материалы и органические соединения)
B	горение жидких веществ
<i>подкласс B1</i>	горение жидких веществ нерастворимых в воде (бензин, эфир, нефтепродукты), горение сублимирующихся твёрдых веществ (парафин, стеарин)
<i>подкласс B2</i>	горение жидких веществ растворимых в воде (спирт, глицерин)
C	горение газообразных веществ (бытового газа, пропана и др.)
D	горение металлов
<i>подкласс D1</i>	горение лёгких металлов, за исключением щелочных (Al, Mg и их сплавы)
<i>подкласс D2</i>	горение щелочных металлов (K, Na)
<i>подкласс D2</i>	горение металлосодержащих и металлоорганических соединений, гидридов металлов
E	электроустановки, находящиеся под напряжением
F	горение радиоактивных материалов и отходов

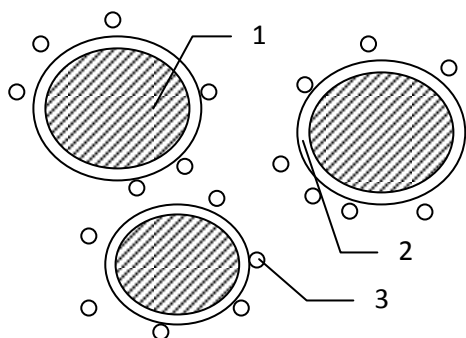
Порошковые огнетушащие составы делятся на огнетушащие порошки общего назначения и огнетушащие порошки специального назначения. К порошкам общего назначения относят составы классов ABC (ABCE) и BC (BCE). Порошки, предназначенные для тушения металлов, считаются специальными. Данная классификация построена по признаку наиболее эффективного применения и не означает, полное отсутствие огнетушащего действия в случае ис-

пользования порошка для тушения очага несоответствующего класса. Так порошок марки ПСБ-3М, относящийся к классу ВС, эффективно тушит отдельную резиновую покрышку (очаг класса А2) и небольшой штабель древесины (очаг класса А1) на открытом пространстве, но, не способен потушить те же материалы при развившемся пожаре в помещении.

#### 4.4.2 Состав и основные области применения огнетушащих порошков

Огнетушащие порошки представляют собой многокомпонентные дисперсные системы, различающиеся по составу и свойствам. Однако все они имеют практически одинаковый по назначению набор компонентов (рис. 4.11):

1. Огнетушащая основа – 90...95 %;
2. Гидрофобизатор – 3...5 %;
3. Наполнители – к ним относят:
  - антидепрессанты – 1...3 %;
  - антиоксиданты – 0,5...2 %;
  - целевые добавки – 1...3 %.



**Рис. 4.11.** Структура порошков

- 1- основа
- 2- гидрофобизатор
- 3- наполнитель

Огнетушащая эффективность и эксплуатационные свойства ПОС определяются химическим составом их компонентов.

**Основа** (табл. 4.3) составляет 90 - 95% массы порошка, и от неё в первую очередь зависит область применения, а также набор остальных компонентов.

*Таблица 4.3. Наиболее распространенные основы огнетушащих порошков*

Класс порошков	Основа		Примечание
ВСЕ	NaHCO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> KHCO <sub>3</sub> K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Бикарбонат (гидрокарбонат) натрия Карбонат натрия Гидрокарбонат калия Карбонат калия	Гигроскопичны
АВСЕ	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Диаммонийфосфат Моноаммоний фосфат (аммофос) Диаммоний сульфат	Плавятся на нагретых поверхностях
D	KCl NaCl C	Хлорид калия Хлорид натрия Графит	

Как видно из табл. 4.3, основой большинства порошков класса ВС являются натриевые и калиевые соли угольной кислоты – карбонаты. При этом огнетушащие составы на основе солей калия несколько более эффективны, чем составы на основе солей натрия.

Однако, данные вещества более гигроскопичны, соответственно, порошки на их основе более склонны к слеживанию, что уменьшает сроки их хранения. Для уменьшения слеживаемости таких порошков приходится использовать более дорогостоящие гидрофобизаторы, что существенно увеличивает их цену. В целом, огнетушащая способность порошковых составов уменьшается в ряду:



Наиболее широко для получения порошков класса *BCE* используется *бикарбонат натрия* ( $\text{NaHCO}_3$ ) в связи с тем, что является самым дешёвым веществом из всех перечисленных. Порошки на его основе применяются повсеместно для тушения розливов жидкостей, электроустановок под напряжением до 1000В, реже – для тушения очагов класса *A2*. Также эффективны они при тушении животных жиров и растительных масел, поэтому такие порошки (и даже чистая питьевая сода) применяется при тушении пожаров и загораний на объектах приготовления пищи, в вытяжных колпаках и вентиляционных каналах, где образуются жировые отложения.

Порошки класса *BC* эффективно прекращают пламенное горения. Однако для тушения жидкостей, в ряде случаев этого может быть недостаточно – необходимо обеспечить хотя бы кратковременное изолирующее действие т.е. прекратить совсем или уменьшить поступление паров горючего в зону горения. Наиболее эффективным в таких случаях должно быть одновременное применение порошка класса *BC* и пены.

Основой большинства порошков класса *ABC* являются *фосфаты аммония* (см. табл. 4.3). Порошки этого класса является универсальным, поскольку могут успешно применяться для тушения веществ, находящихся в трех агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. Однако определяющим здесь является способность воздействовать на поверхность твёрдого вещества. При нагреве до температуры порядка 120°C фосфаты аммония начинают плавиться с поглощением тепла. Попадая на поверхность, нагретую выше данной температуры, частицы огнетушащего вещества отбирают от неё тепло на осуществление фазового превращения. Кроме того, на поверхности они образуют вязкую полимерную пленку плава, оказывающую изолирующее действие.

Огнетушащие порошки специального назначения были разработаны для тушения металлов: магния, калия, натрия и их сплавов, титана, циркония, порошкообразного алюминия и некоторых других, т.е. очагов класса *D*. Это единственные огнетушащие вещества, которые позволяют локализовывать и тушить пожары металлов, не вызывая при этом бурной химической реакции.

Существует несколько типов огнетушащих порошков специального назначения. В основе первого лежит графит, способствующий активному отводу тепла от зоны горения. Второй – на основе хлорида калия. Он совместим с

пенной на основе протеинового пенообразователя. Его огнетушащая способность примерно такая же, как у порошка на основе бикарбоната калия.

Основой порошка третьего типа служит хлорид натрия. Он подается из переносных огнетушителей с помощью углекислого газа, а из передвижных или стационарных систем – с помощью азота. Так же как и порошки графитового типа, этот порошок очень эффективен при тушении очагов класса *D*.

Основным принципом достижения положительного результата при тушении металлов и металлоорганических соединений является создание с помощью огнетушащего порошка защитного покрытия на поверхности горения, препятствующего доступу к ней кислорода. Такое покрытие должно быть достаточно плотным, иметь необходимую толщину слоя порошка по всей поверхности очага горения, что достигается при определенном удельном расходе порошка ( $\text{кг/м}^2$ ).

В качестве **гидрофобизаторов** обычно используются некоторые минеральные соединения и стеараты металлов. Это аэросил ( $\text{SiO}_2$ ) чистый или с добавками дихлордиметилсилана  $(\text{CH}_3)_2\text{Cl}_2\text{Si}$ ; стеараты кальция, магния, алюминия, например  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Ca}$  – стеарат кальция;  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Mg}$  – стеарат магния;  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_3\text{Al}$  – стеарат алюминия; триалкилфосфаты  $\text{R}_3\text{PO}_4$ , где R – углеводородный радикал (например, трибутилфосфат  $(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}_4$ ).

**Наполнителями** обычно служат добавки, улучшающие текучесть порошков и предотвращающие их комкование и слеживаемость. В этом качестве используют, например, нефелиновый концентрат ( $\text{Na}_2\text{O} (\text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$ ); тальк ( $3\text{MgO} - 4\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ); слюда  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ; порошкообразный графит (углерод).

#### 4.4.3 Механизмы огнетушащего действия порошков

В процессе тушения порошки проявляют сразу несколько явно выраженных механизмов огнетушащего действия. Основными из этих механизмов являются:

- охлаждение зоны горения с одновременным проявлением эффекта огнепреграждения,
- охлаждение поверхности горючего,
- гомогенное и гетерогенное ингибирование зоны химической реакции.

Эти механизмы не только дополняют, но и оказывают взаимное влияние друг на друга. Также порошки проявляют эффект разбавления зоны горения, а фосфорно-аммонийные составы – еще и эффект изолирования, когда плавятся на нагретых поверхностях и образуют пленку, препятствующую поступлению горючего в зону горения.

1. *Охлаждающий эффект.* Передача тепла от очага к порошковой частице происходит за счет теплопроводности, конвекции и радиации. Каждая частица порошка при этом нагревается от начальной температуры до температуры фазовых переходов, разложения, плавления и испарения основы.

Полный теоретический охлаждающий эффект порошков может быть выражен формулами:

– для порошков с плавящейся основой (класса *ABC*):

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{пл}} - T_0) + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{исп}} \quad (4.4)$$

– для порошков с неплавящейся основой (класса *BC*):

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{нагр}} - T_0) \quad (4.5)$$

где

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления порошка, К;

$T_{\text{нагр}}$  – максимальная температура нагрева порошка в процессе тушения, К;

$T_0$  – начальная температура, К;

$Q_{\text{пл}}$  – удельная теплота плавления порошка, Дж/кг;

$Q_{\text{исп}}$  – удельная теплота испарения (возгонки), кДж/кг.

Таким образом степень прогрева и испарения частиц порошка в пламени зависит в основном от диаметра частицы и скорости газового потока, формирующего пламя, а в случае ее разложения – еще и от индивидуальной для данного вещества скорости разложения. Для тонкодисперсных порошков с диаметром частиц 1 – 10 мкм возможно испарение значительной доли порошкового облака в очаге, однако и в этом случае увеличивается скорее вклад гомогенного ингибирования, а не теплоотвода.

2. *Эффект огнепреграждения.* Эффект огнепреграждения заключается в энергоотводе химической энергии из реакционной зоны и практически мгновенной по всему объему «тепловой» гибели активных центров реакции. При этом свойства огнетушащего порошка особой роли не играют.

А если поверхность частиц порошка еще и химически активна, то к тепловой гетерогенной гибели активных центров добавляется и их химическая дезактивация.

3. *Гетерогенное ингибирование* осуществляется в том случае, если поверхность твердых частиц химически активна по отношению к радикалам зоны химических реакций в пламени.

4. *Гомогенное ингибирование.* Молекулы порошкового ингибитора (в случае испарения) или их «осколки» (в случае разложения), перешедшие в газовую фазу, вступают в реакцию с активными центрами пламени ( $\text{H}^*$ ,  $\text{O}^*$ ,  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}_3^*$  и т.д.) и могут замедлить цепной процесс распространения горения в газовой смеси.

Так, при нагревании и испарении солей типа хлористого калия в газовую фазу, помимо молекул  $\text{KCl}$  поступают и продукты их термического распада – атомы калия и хлора. При разложении фосфорно-аммонийных солей – молекулы аммиака, продукты его деструкции и окисления – радикалы  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}$ , оксид  $\text{NO}$ . При температурах свыше  $800^\circ\text{C}$  и более глубокой деструкции –  $\text{PO}$ ,  $\text{PO}_2$ . При разложении  $\text{NaHCO}_3$  – диоксид углерода.

Эффективно в подобных реакциях ингибируется атомарный кислород, наименее – атомарный водород. Гидроксил-радикал занимает промежуточное



положение, однако его реакция взаимодействия с радикалом  $\text{NH}_2^*$  протекает даже без энергетического барьера.

5. *Изолирование нагретой поверхности.* Эффективно проявляется как на поверхности твердого тела, так и на поверхности жидкостей, где плавающий слой порошка (пока он не утонул) оказывает существенное изолирующее и экранирующее действие. Плавающие компоненты порошков класса А могут успевать испариться в высокотемпературном пламени жидкостей, растворяться в жидкости.

Этот эффект проявляется у порошковых составов, склонных к плавлению и полимеризации при высоких температурах. Процесс образования при этом сплошной расплавленной пленки называют *коалесценцией*.

Огнетушащая эффективность порошков зависит от ряда свойств, таких как текучесть, гидрофобность (водоотталкивающие свойства), слеживаемость, совместимость с пеной, электропроводность, абразивное действие на вращающиеся части машин.

Доминирующий механизм огнетушащего действия ПОС определяет наиболее рациональный способ их подачи в зону горения.

При *тушении пламени газовых фонтанов* целесообразно реализовать объемные механизмы тушения: разбавление, химическое ингибирование и т.д. Это определяет и способ, и зону наиболее интенсивной подачи ПОС: рассредоточенно, объемно, снизу вверх, преимущественно в факел пламени.

При *тушении щелочных металлов* должны реализоваться изолирующее и охлаждающее поверхность горючего материала действие порошковой массы. Поэтому огнетушащие порошки подаются компактно, сосредоточенно, сверху вниз или сбоку, чтобы создать на поверхности материала более толстый слой порошковой массы.

При *разливе ЛВЖ или ГЖ* или при *пожарах в резервуарах* с указанными жидкостями ПОС должны подаваться в зависимости от их химической природы и доминирующего механизма их огнетушащего действия.

Тушение пожаров порошковыми средствами может осуществляться из различного пожарного оборудования: переносных и передвижных огнетушителей, автомобилей порошкового тушения, стационарных установок.

Применение порошков имеет следующие *преимущества*:

- порошковое облако создает защиту от теплового излучения,
- большой температурный диапазон для хранения порошков (от  $-50$  до  $+60^\circ\text{C}$ ),
- порошки нетоксичны,
- порошки универсальны.

К *недостаткам* порошковых огнетушащих средств относятся:

- сильное запыление;
- их нельзя применять при тушении высоко чувствительных установок, при тушении пожаров в библиотеках, архивах;
- порошковые составы имеют склонность к слеживанию, комкованию, они гигроскопичны.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Виды и рецептура огнетушащих порошков. Эксплуатационные особенности.
2. Какие минеральные соли составляют основу порошковых огнетушащих составов?
3. Опишите механизм огнетушащего действия ПОС.
4. Что понимают под гетерогенным ингибированием реакции горения порошками? Какова его эффективность?
5. Как снизить слеживаемость порошков и склонность их к комкованию?
6. В чем преимущества использование ПОС при тушении пожаров по сравнению с другими ОС?
7. В чем особенности подачи ПОС в зависимости от вида пожара?

## РАЗДЕЛ 4.5. ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА. АЭРОЗОЛИ. ХЛАДОНЫ

### 4.5.1 Классификация и основные механизмы огнетушащего действия АОС

Объемное аэрозольное пожаротушение является одним из наиболее перспективных способов борьбы с пожарами.

*Аэрозольные (аэрозолеобразующие) огнетушащие составы (АОС)* представляют собой твердотопливные композиции (ТТК), основой которых являются горючие смеси кислородосодержащих и горючих компонентов с целевыми и технологическими добавками.

При реакции горения таких композиций выделяется смесь твердых (аэрозоль) и газообразных продуктов горения, образующая огнетушащую газообразную смесь витающих частиц аэрозоля размером  $0,5 \div 2,5$  мкм и нейтральных газов.

В целом рецептуру аэрозолеобразующих составов принято разделять на:

**1. Базовые компоненты** – которые обеспечивают протекание устойчивой самоподдерживающейся реакции горения. К ним относят:

– *горючую основу* (фенолформальдегидная смола, эпоксидные диановые смолы, полиэфирные смолы, синтетические каучуки, смеси нитроцеллюлозы с пластификаторами);

– *окислители* (нитрат калия, перхлорат калия, нитрат натрия или бария).

**2. Целевые компоненты** – обеспечивают требуемые для практического применения физико-химические и эксплуатационные характеристики зарядов. Это могут быть *дициандиаמיד* (увеличивает производительность и снижает  $T_2$ ), *порошок магния, хроматы калия и аммония* (интенсифицируют горение), *карбонат калия, магния, хлорид натрия, калия* (снижают  $T_2$ ).

**3. Технологические компоненты** – вводят для обеспечения технологичности, экономичности и безопасности производства зарядов.

Характеристики некоторых твердотопливных композиций (ТТК) представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Характеристики ТТК-4 и ТТК-6

Наименование ТТК	ТТК-4	ТТК-6
Состав ТТК:		
Органическая смола, % (масс)	20,0	26,0
$KNO_3$ , % (масс)	35,0	31,6
$KClO_4$ , % (масс)	45,0	42,4
Продукты горения:		
$KCl$ , % (об)	0,60	0,66
$K_2CO_3$ , % (об)	0,80	0,84
$CO_2$ , % (об)	2,28	4,97
$O_2$ , % (об)	20,87	18,4
$N_2$ , % (об)	75,0	74,5
$H_2O$ , % (об)	0,45	0,63

Наименование ТТК	ТТК-4	ТТК-6
Характеристики горения:		
Теплота сгорания, кДж/кг	3100	2950
Скорость горения, мм/с	0,66	0,45
Огнетушащая концентрация, кг/м <sup>3</sup>	0,05	0,04
Температура аэрозоля, °С	1590	1550

В зависимости от основных физико-химических, технологических, прочностных, экологических и других наиболее важных эксплуатационных свойств АОС условно классифицируют:

1. *По огнетушащей способности:*

- высокоэффективные – с удельным расходом не более 50 г/м<sup>3</sup>;
- с повышенной огнетушащей способностью – не более 100 г/м<sup>3</sup>;
- эффективные составы – 100÷200 г/м<sup>3</sup>;
- составы средней эффективности – 200÷500 г/м<sup>3</sup>.

2. *По экологической безопасности:*

- экологически безопасные (коэффициент относительного озоноразрушающего действия КОД=0, класс опасности по токсичности аэрозолей в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 – малоопасные);
- экологически малоопасные (КОД<0,1, класс опасности по ГОСТ 12.1.044-89 – умеренноопасные).

3. *По эксплуатационной безопасности:*

- легковоспламеняющиеся умеренно опасные (с температурой самовоспламенения  $T_{св}>450^{\circ}\text{C}$ , температурой горения  $T_z<1000^{\circ}\text{C}$ , линейной скоростью распространения пламени  $V_n<5$  мм/с);
- легковоспламеняющиеся повышенной опасности ( $T_{св}=300\div450^{\circ}\text{C}$ ,  $T_z=1000\div1500^{\circ}\text{C}$ ,  $V_n<10$  мм/с);
- легковоспламеняющиеся высокоопасные ( $T_{св}<300^{\circ}\text{C}$ ,  $T_z>1500^{\circ}\text{C}$ ,  $V_n>10$  мм/с).

4. *По температуре горения:*

- низкотемпературные ( $T_z<800^{\circ}\text{C}$ );
- среднетемпературные ( $T_z=800\div1000^{\circ}\text{C}$ );
- с повышенной температурой горения ( $T_z=1000\div1500^{\circ}\text{C}$ );
- высокотемпературные ( $T_z>1500^{\circ}\text{C}$ ).

5. *По скорости горения:*

- медленногорящие ( $V_n<1$  мм/с);
- умеренногорящие ( $V_n=1\div5$  мм/с);
- быстрогорящие ( $V_n=5\div10$  мм/с);
- высокоскоростные ( $V_n>10$  мм/с).

6. *По газопроизводительности:*

- низкой газопроизводительности (<0,2 л/г);
- средней газопроизводительности (0,2÷0,4 л/г);
- повышенной газопроизводительности (0,4÷0,7 л/г);
- высокой газопроизводительности (>0,7 л/г).

7. По кислородному балансу (коэффициенту обеспеченности окислителем):

- с отрицательным кислородным балансом ( $\alpha_{ок} < 1$ );
- с нулевым кислородным балансом ( $\alpha_{ок} = 1$ );
- с положительным кислородным балансом ( $\alpha_{ок} > 1$ ).

8. По допустимому температурному диапазону эксплуатации заряда:

- нормальной температуроустойчивости (до  $30 \div 40^\circ\text{C}$ );
- повышенной температуроустойчивости (до  $40 \div 50^\circ\text{C}$ );
- высокой температуроустойчивости (до  $50 \div 70^\circ\text{C}$ ).

Также АОС можно классифицировать по гигроскопичности, прочности, технологии изготовления и другим характеристикам.

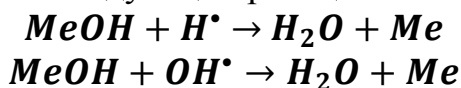
#### 4.5.2 Основные механизмы огнетушащего действия аэрозолей

Механизм огнетушащего действия аэрозольных огнетушащих составов сводится к реализации следующих основных процессов:

1. Разбавление горючей среды газообразными продуктами реакции горения (флегматизация зоны горения). При этом происходит снижение концентрации и горючего  $\varphi_{г}$ , и окислителя  $\varphi_{ок}$  в зоне реакции, и как следствие – уменьшением числа активных соударений и скорости реакции;

2. Дополнительное снижение концентрации кислорода в зоне реакции еще на  $1 \div 4\%$  вследствие догорания недоокисленных продуктов реакции АОС с отрицательным кислородным балансом  $\alpha_{ок} < 1$ ;

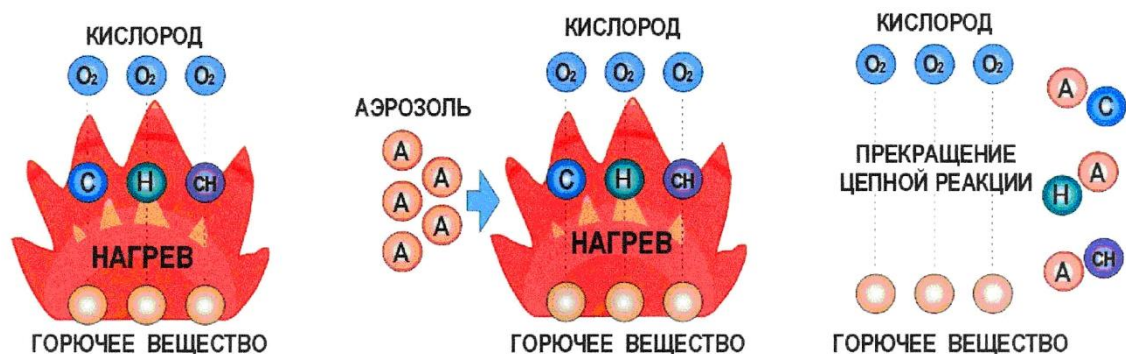
3. Ингибирование пламени мелкодисперсными частицами аэрозолей солей металлов (рис. 4.12). Современные представления о гомогенном механизме ингибирования, основанном на взаимодействии с активными центрами в газовой фазе, базируются на следующих реакциях:



где

$Me$  –  $K$  или  $Na$ , которые являются катионами солей, используемым в АОС.

Установлено, что твердые частицы АОС в зоне пламени не испаряются, остаются твердыми и поэтому, чем выше степень дисперсности используемого порошка, тем больше удельная поверхность. В результате происходит гетерогенное ингибирование процесса горения. Таким образом, тушение с использованием АОС происходит в большей степени за счет гетерогенного механизма.



**Рис. 4.12.** Механизм ингибирующего действия аэрозолей

1. Охлаждение зоны горения массой образовавшегося аэрозоля. Например, состав получившегося аэрозоля соответствует  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$  в количестве 50% массы и  $CO_2$  в количестве 50%. Суммарный тепловой эффект охлаждения массой аэрозоля при этом составляет около 5290 кДж/кг, то есть намного больше, чем у огнетушащих порошков и даже немного выше, чем у распыленной воды.

К преимуществам АОС по сравнению с хладонами можно отнести следующие их свойства:

- более высокая эффективность;
- инертность ингибирующего аэрозоля по отношению к озоновому слою атмосферы;
- сравнительно низкая токсичность;
- отсутствие коррозионной активности по отношению к металлам всех типов;
- диэлектрические свойства;
- практически отсутствие воздействия на книги, предметы искусства, пищевые продукты и т. д.

Твердые частицы не оказывают вредного действия на одежду и кожные покровы человека, не вызывают порчу имущества, легко удаляются из помещения (например, с помощью воды или пылесоса).

АОС обладают определенными *недостатками*:

1) АОС нагреваются до высокой температуры в момент получения, и в результате возникает открытое пламя.

2) Низкая эффективность при тушении тлеющих материалов.

3) Аэрозоль поднимается под потолок и только по мере охлаждения приобретает способность равномерно распределяться в помещении и достигать очага пожара в любой точке. При этом значительно увеличивается время тушения и потери аэрозоля через неплотности.

4) Составляющие компоненты (твердое топливо и окислитель) горят с факелом пламени, в котором и выделяется значительная часть тепла. Воздух не является охладителем, т.к. благодаря ему тепловыделение в факеле продолжается.

Аэрозоль раздражает слизистые оболочки органов дыхания и глаз, поэтому запрещается их применение:

- в помещениях, где находятся люди;
- при отсутствии признаков пламенного горения;
- в случаях, когда выход аэрозоля через неплотности и проемы в горящем помещении будет препятствовать эвакуации людей.

Даже крайне ограниченное по времени нахождение человека в «атмосфере» огнетушащего аэрозоля может представлять опасность его здоровью. Поэтому необходимо обеспечивать условия эвакуации людей из помещений, оборудованных генераторами огнетушащего аэрозоля (ГОА), и своевременное оповещение (звуковое и световое) о предстоящем их запуске.

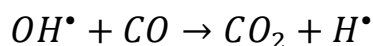
### 4.5.3 Тушение пожаров хладонами

Галогенпроизводные предельных углеводородов находят широкое применение как средство тушения и предупреждения пожаров и взрывов. Они оказывают активное воздействие на зону реакции горения, влияют на кинетику и механизм протекающих в пламени реакций и поэтому получили название *хладонов* или *химически активных ингибиторов* (ХАИ). К ним относятся: четыреххлористый углерод ( $CCl_4$ ), дибромметан ( $CH_2Br_2$ ), дибромэтан ( $C_2H_4Br_2$ ), тетрафтордибромэтан ( $C_2F_4Br_2$ ), тетрафтордихлорэтан ( $C_2F_4Cl_2$ ) и т.д.

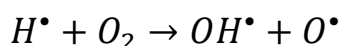
Использование хладонов в качестве огнетушащих средств определяется такими физическими свойствами как плотность, температура кипения и плавления, вязкость, электропроводность. Механизм тушения ХАИ заключается в снижении скорости химической реакции или в снижении скорости тепловыделения в зоне реакции, или в расширении зоны реакции.

Известно, что процессы горения и взрывов относятся к классу цепных реакций, т.е. являются многостадийными. В результате горения образуются промежуточные продукты разложения горючего, затем продукты неполного окисления, потом промежуточные продукты взаимодействуют между собой и с горючим или окислителем, образуются конечные продукты реакции. Причем каждая последующая стадия может начаться при взаимодействии не любых промежуточных продуктов, а лишь химически активных радикалов.

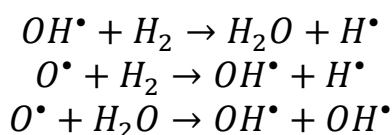
Например, горение органических соединений протекает в две стадии. На первой стадии исходное горючее, окисляется до CO и  $H_2O$ , на второй стадии оксид углерода (II) сгорает до  $CO_2$ . Причем вторая стадия является лимитирующей. На этой стадии, при температурах порядка 1000К, в результате взаимодействия CO с гидроксильной группой OH образуется конечный продукт  $CO_2$  и активный центр – радикал H:



Радикал H реагирует с  $O_2$  и образуется два активных центра – радикалы OH и O:

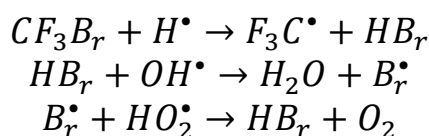


В результате реакций с участием этих радикалов появляется один конечный продукт –  $H_2O$  и уже три активных центра и т.д.:



Т.е. реакция представляет собой разветвленный цепной процесс. Если в зону его протекания ввести дополнительные вещества, нейтрализующие активные центры, которые участвуют в продолжении цепей ( $H^\bullet$ ,  $OH^\bullet$ ,  $HO_2^\bullet$ ) будет происходить обрыв этих цепей, торможение реакции, уменьшение интенсивности тепловыделения и, в конечном счете, прекращение горения.

Подобным действием и обладают хладоны. Например, взаимодействие хладона с активными центрами реакции горения будет выглядеть следующим образом:



Количество ХАИ, которое надо ввести в зону реакции для прекращения горения, очень мало. Для наиболее эффективных хладонов оно составляет 2–4%, что в десятки раз меньше огнетушащих концентраций используемых на практике нейтральных газов (у углекислого газа, например, 25–30%, аргона – 50–55%, азота – 35–40%, водяного пара – 30–35% и т. д.).

На огнетушащие концентрации галоидоуглеводородов большое влияние оказывает энергетика процесса горения. Если пожары «малоэнергетичные», т.е. для испарения жидкость получает энергию только от пламени, тогда тушение может быть достигнуто при небольших концентрациях ХАИ. «Среднеэнергетичные» пожары, т.е. кроме пламени тепло на испарение жидкости поступает от других источников, или высокоэнергетичные пожары, имеются кроме дополнительных источников тепла еще и дополнительные источники зажигания, тогда концентрация ХАИ увеличивается в несколько раз.

Наиболее эффективно воздействие ХАИ на саму зону реакции, т.е. их применение эффективно для прекращения пламенного горения, и их используют для тушения пожаров в замкнутых объемах. Поэтому они применяются в стационарных установках для тушения внутренних пожаров. Ингибиторами заполняют весь объем, где произошел пожар, доводя концентрацию до равной или выше огнетушащей, необходимо учитывать утечки через неплотности, а также неравномерность их распределения по всему объему.

Галоидоуглеводороды применяют в основном для тушения пожаров воспламеняющихся веществ, таких как бензин, нефть, лаки; для тушения в электрических установках, двигателей самолетов, трансформаторов, коммутаторов, карбюраторов, грузовых автомобилей, ракетного горючего. Выбор химически-активного ингибитора зависит от давления его паров, температуры замерзания, электропроводности, стабильности, токсичных свойств, стоимости. Большое значение имеет их расход на тушение, а также время подачи. Чаще всего галоидоуглеводороды подают на очаг пожара в избытке.

*Преимущества ХАИ:*

– после тушения они быстро испаряются, благодаря чему исключается повторная воспламеняемость,



– высокая эффективность и морозоустойчивость.

К недостаткам относятся:

– токсичность,

– нельзя применять при тушении пожаров, сопровождающихся тлением, т.к. могут образовываться токсичные продукты пиролиза,

– нельзя применять при тушении пожаров щелочных и щелочноземельных металлов (Mg, Al, Na), т.к. возможен взрыв.

Для хладонов разработана системы обозначений – номенклатура, представляющая из себя буквенно-цифровой шифр содержания различных элементов в молекуле вещества. Расшифровка производится справа - налево. Последняя цифра обозначает количество атомов фтора в молекуле; предпоследняя – атомов водорода, увеличенное на 1 (т.е. H+1); первая – атомов углерода, уменьшенное на 1 (т.е. C–1). В маркировку бромсодержащих хладонов, добавлена буква «В» и цифра, означающая количество атомов брома. В данной системе маркировки не указываются напрямую атомы хлора. Предполагается, что хлор занимает оставшиеся свободные связи. Например:

*13B1 – CF<sub>3</sub>Br, здесь*

*Br = 1, F = 3; H + 1 = 1, значит H = 1 – 1 = 0; C – 1 = 0, откуда C = 0 + 1 = ;*

*114B2 – C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>Br<sub>2</sub>, здесь*

*Br = 2, F = 4, H = 1 – 1 = 0, C – 1 = 1, откуда C = 1 + 1 = 2;*

*12B1 – CF<sub>2</sub>ClBr, здесь*

*Br = 1, F = 2; H + 1 = 1, следовательно, H = 1 – 1 = 0; C – 1 = 0, откуда C = 0 + 1 = 1, оставшаяся у углерода одна свободная связь занята Cl;*

Энергия химической связи уменьшается в ряду C – F > C – Cl > C – Br. Поэтому бромсодержащие углеводороды подвергаются термической диссоциации при более низких температурах и оказывают более сильное ингибирующее действие на реакцию горения. В связи с этим можно предположить, что еще большей огнетушащей способностью будут обладать иодсодержащие углеводороды.

Применение в качестве огнетушащих веществ нашли хладоны 12B1, 13B1 и 114B2. Некоторые свойства этих хладонов, а также, для сравнения, свойства диоксида углерода приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Свойства хладонов и углекислого газа

Хладон	Температура кипения, °С	Минимальная флегматизирующая концентрация, % об	Токсичность (LD <sub>50</sub> )*, % об
12B1	-4	3,8	13
13B1	-58	3,5	80
114B2	47	2,5	10
CO <sub>2</sub>	-76	28	9

\*Токсичность LD<sub>50</sub> – концентрация вещества в воздухе, вызывающая гибель половины подопытных животных в стандартных условиях испытаний.

Из таблицы 4.5 видно, что огнетушащие концентрации этих хладонов, в отличие от  $\text{CO}_2$ , в несколько раз меньше концентраций, при которых возможен летальный исход. Что позволяет применять хладоновые установки пожаротушения в тех случаях, когда затруднена или невозможна эвакуация людей.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что такое огнетушащие аэрозоли?
2. Какие компоненты входят в состав аэрозолеобразующих композиций?
3. Каковы области применения аэрозольного пожаротушения?
4. Каковы ограничения применения аэрозольного пожаротушения?
5. Перечислите механизмы огнетушащего действия аэрозолей.
6. В чем заключается механизм ингибирования реакции горения аэрозодем?
7. Из каких составляющих может складываться тепловой эффект охлаждения аэрозодем?
8. Какие существуют способы охлаждения потока подаваемого на тушение аэрозоля?
9. Что такое химически активные ингибиторы?
10. Назовите механизмы огнетушащего действия ХАИ.
11. От чего зависит огнетушащая эффективность ХАИ?
12. Как расшифровывают обозначения марок хладонов?
13. Что такое озоноразрушающий потенциал ХАИ?
14. Какую опасность представляет токсическое действие хладонов?

## РАЗДЕЛ 4.6. ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА. ИНЕРТНЫЕ ГАЗЫ

### 4.6.1 Классификация газовых огнетушащих составов

*Нейтральные (инертные) газы (НГ)* – это вещества, которые химически не взаимодействуют с горючим веществом или окислителем, но при нахождении в зоне горения оказывают влияние на протекающие в ней физико-химические процессы. В качестве инертных разбавителей чаще всего применяют азот, углекислый газ, водяной пар, дымовые или отработанные газы, газосодержащие смеси, реже гелий и аргон.

Из перечисленных газов только гелий и аргон являются химически *инертными веществами*, не вступающими в реакции с другими веществами. Остальные способны вступать в различные химические реакции и являются нейтральными только по отношению к компонентам конкретной реагирующей смеси, так как или просто не вступают в реакцию горения, или сами являются ее продуктами.

*Диоксид углерода* (углекислый газ,  $\text{CO}_2$ ) наиболее широко применяемый из указанных нейтральных газов. Он используется для тушения в тех случаях, когда применение воды или других огнетушащих средств может вызвать взрыв, интенсифицировать процесс горения или вызвать повреждение оборудования и материалов (телефонные станции, музеи, выставки, архивы, картинные галереи, книгохранилища, приборы под напряжением, аккумуляторные станции, сушильные печи, стенды для испытания двигателей, исследовательские лаборатории и т. д.). Кроме тушения пожаров в помещениях, пустотах конструкций  $\text{CO}_2$  применяют для защиты свободных объемов с целью предупреждения взрывов в качестве нагнетающего газа для перекачки ЛВЖ.

Следует помнить, что в повышенных концентрациях в воздухе  $\text{CO}_2$  вызывает раздражение слизистой оболочки глаз и дыхательных путей. Возможно также поражение кожи, которое проявляется в виде ожога. Внезапное воздействие  $\text{CO}_2$  в количестве 6–10% об. может вызвать смертельный исход. Поэтому при применении углекислого газа в системах объемного тушения должно быть предусмотрено сигнализирующее устройство, предупреждающее об опасности. Промежуток времени между сигналом и пуском установки должен быть достаточным для эвакуации людей из помещения.

Не рекомендуется применять  $\text{CO}_2$  для тушения пожаров в высокочувствительных установках, например, в установках слабого тока, телеизвещателях, радиостанциях, электронных установках. Не используют его для тушения щелочных и щелочноземельных металлов, алюминия, некоторых гидридов и карбидов металлов, металлоорганических соединений, водорода, раскаленного углерода и т.д. В случае, когда углекислый газ применять нельзя, используют азот или аргон.

Применение *азота* для объемного тушения экономически менее выгодно, чем двуокиси углерода, из-за его более высокой стоимости и значительного расхода. Азот используется в стационарных установках для тушения Na, K, Be, Ca и других металлов, которые горят в атмосфере  $\text{CO}_2$ . Как и углекислый газ,

азот плохо тушит волокнистые (хлопок, ткани и т. п.), тлеющие (дерево, бумага и т. д.) и некоторые другие материалы. Он нашел применение в технологических установках для заполнения свободных объемов и сосудов над ЛВЖ с целью предохранения производственных установок и аппаратуры от взрыва.

Использование *азота* в качестве огнетушащего средства обусловлено большой прочностью связи в молекуле азота являющейся причиной его малой химической активности. Лишь с некоторыми щелочными металлами (например, литием) азот реагирует при невысоких температурах. С большинством других химических элементов азот, если и реагирует, то при нагревании. С кислородом азот взаимодействует при температурах выше 2000 °С с образованием оксидов (NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>), с металлами при высокой температуре дает нитриды. Некоторые из них, в частности образованные магнием, алюминием, цирконием, литием чувствительны к удару и взрывоопасны, что исключает применение азота для тушения этих металлов. Как и диоксид углерода, он плохо тушит волокнистые, тлеющие и некоторые другие материалы.

Огнетушащая концентрация азота для тушения большинства веществ составляет не менее 40 об. %.

*Аргон* используют в металлургических и химических процессах, требующих инертной среды, в светотехнике, электронике, ядерной энергетике, для тушения пожаров некоторых металлов, когда использование азота может сопровождаться образованием нитридов, обладающих взрывоопасными свойствами.

*Водяной пар* как огнетушащее средство используют в основном на предприятиях, имеющих мощное паросиловое хозяйство, – нефтеперерабатывающих заводах, тепловых станциях, деревообрабатывающих предприятиях и т. п. В силу невысокой эффективности тушения он может применяться для защиты закрытых технологических аппаратов и помещений до 500 м<sup>3</sup> (трюмы судов, трубчатые печи нефтехимических предприятий, насосные станции по перекачке нефтепродуктов, сушильные и покрасочные камеры), для тушения небольших пожаров на открытых площадях и создания завес вокруг защищаемых объектов.

*Тонкораспыленная вода* в виде капель размером менее 100 мкм может быть получена с помощью специального оборудования (стволов-распылителей, например). Образующиеся при этом водяные струи обладают небольшой ударной силой и дальностью полета, но способны орошать значительную площадь поверхности. В таком состоянии вода интенсивно испаряется и характеризуется повышенным охлаждающим эффектом, хорошо разбавляет горючую среду, быстро снижает температуру, осаждаем дым. При этом материалы при их тушении увлажняются незначительно.

#### *Преимущества газового пожаротушения*

Тушение пожара с помощью газовых огнетушащих составов (ГОС) получило широкое распространение благодаря ряду преимуществ, в том числе:

– тушение пожара с помощью ГОС осуществляется по всему объему помещения;

- огнетушащие газовые смеси нетоксичны, химически инертны, при нагревании и контакте с горящими поверхностями не распадаются на ядовитые и агрессивные фракции;
  - газовое пожаротушение практически не наносит вреда оборудованию и материальным ценностям;
  - после окончания тушения ГОС легко удаляются из помещения простым проветриванием;
  - применение ГОС обладает высокой скоростью тушения пожара.
- Недостатки газового пожаротушения:*
- тушение пожара газом требует герметизации помещения;
  - газовое пожаротушение малоэффективно в помещениях большого объема либо на открытом пространстве;
  - хранение снаряженных газовых модулей и техническое обслуживание системы пожаротушения сопряжено с трудностями, которые сопутствуют хранению веществ под давлением;
  - установки газового пожаротушения чувствительны к температурному режиму;
  - ГОС непригодны для тушения веществ, способных гореть без доступа кислорода.

#### 4.6.2 Механизм тушения инертными газами

Из курса теории горения известно, что смесь горючих газов или паров с окислителем способна воспламениться от источника зажигания если концентрация горючего в ней соответствует области воспламенения, т.е.  $\varphi_{\text{нкр}} \leq \varphi_{\text{г}} \leq \varphi_{\text{вкр}}$ . Добавление третьего компонента, не способного вступать в реакцию ни с горючим, ни с окислителем, уменьшает концентрацию молекул обоих компонентов в единице объема (т.е.  $\varphi_{\text{г}}$  и  $\varphi_{\text{ок}}$ ). Введение негорючих газов в зону реакции в результате разбавления горючей смеси снижает интенсивность тепловыделения за счет уменьшения скорости реакции:

$$q^+ = Q_{\text{н}} k_0 \varphi_{\text{г}}^n \varphi_{\text{ок}}^m \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.6)$$

где:

$Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания горючего, кДж/моль;

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель;

$\varphi_{\text{г}}$  и  $\varphi_{\text{ок}}$  – концентрация горючего и окислителя соответственно, % об.;

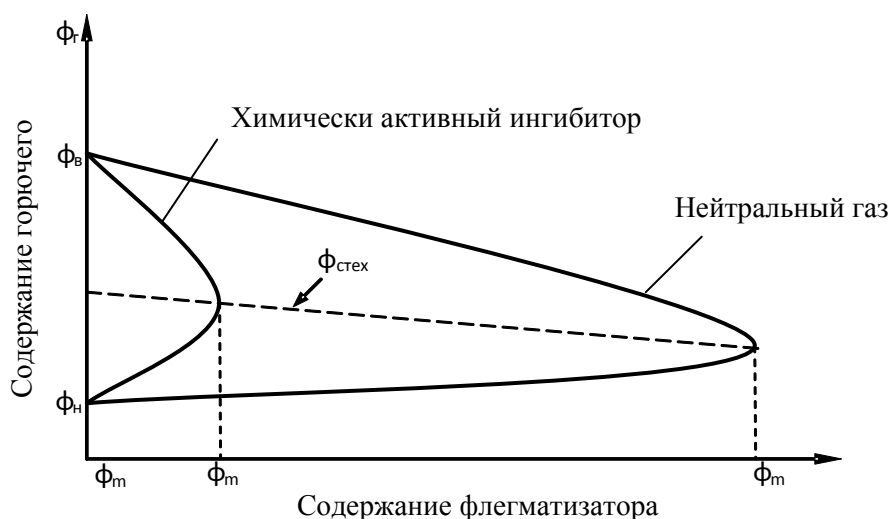
$n$  и  $m$  – порядок реакции по горючему и окислителю, соответственно;

$E$  – энергия активации, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

$T$  – температура, К.

Концентрационная область воспламенения при добавлении флегматизатора сужается и при некоторой его концентрации верхний предел становится равным нижнему. Данная концентрация называется минимальной флегматизирующей  $\varphi_{\text{м}}$  (рис. 4.13).



**Рис. 4.13.** Влияние флегматизатора на область воспламенения

Эффективность нейтральных газов при их использовании для предотвращения воспламенения образовавшейся горючей смеси должна зависеть от теплоемкости.

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо для нагревания единицы количества газа на 1 градус. В технических расчетах теплоемкость измеряют в килоджоулях (кДж). В зависимости от того, в каких единицах измеряют количество газа, различают: мольную, массовую и объемную теплоемкость.

В зависимости от характера протекания процесса, при котором происходит подвод или отвод теплоты, величина теплоемкости газа будет различной. Если газ нагревается при постоянном объеме ( $V = const$ ), то теплота расходуется только на повышение его температуры. Если газ может свободно расширяться, то при подводе теплоты давление газа остается постоянным ( $P = const$ ). При этом, подогреваясь, газ расширяется и производит работу против внешних сил при одновременном увеличении его температуры. Для того чтобы разность между конечной и начальной температурами во время нагрева газа в процессе  $P = const$  была бы такой же, как и в случае нагрева при  $V = const$ , количество затрачиваемой теплоты должно быть больше на величину, равную совершенной газом работы в процессе  $P = const$ . Из этого следует, что теплоемкость газа при постоянном давлении будет больше теплоемкости при постоянном объеме.

В табл. 4.6 приведены сравнительные данные по теплоемкости наиболее распространенных нейтральных газов при  $25^{\circ}\text{C}$ . Из них следует, что, хотя наибольшим значением массовой теплоемкости обладает гелий, но самым эффективным является  $\text{CO}_2$ , 1 киломоль или кубометр которого обладает наибольшей объемной теплоемкостью.

Таблица 4.6. Значения теплоемкостей нейтральных газов

Газ	$c_p^{298}$			$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\frac{c_p}{\lambda} \cdot 10^{-3}$	$\varphi_m$ , %об.	$\varphi_{огн}$ , %об.
	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$				
CO <sub>2</sub>	0,84	37,0	1,54	1,66	2,23	25÷35	28
N <sub>2</sub>	1,04	29,1	1,21	2,57	1,13	35÷48	31
H <sub>2</sub> O <sub>пар</sub>	1,87*	33,7*	1,1*	2,50	1,35	35÷40	-
He	5,20	20,8	0,87	15,2	0,136	35÷40	30
Ar	0,52	20,4	0,85	1,77	1,152	40÷51	38

Примечание:  $M$  – молярная масса,  $c_p^{298}$  – удельная теплоемкость при 298К,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\varphi_m$  – минимальная флегматизирующая концентрация,  $\varphi_{огн}$  – минимальная огнетушащая концентрация.

Действительно, чем выше теплоемкость вводимого в зону горения нейтрального газа, тем интенсивнее теплоотвод из зоны химической реакции, а значит, эффективнее его огнетушащее действие.

Однако не только теплоемкость определяет огнетушащую эффективность инертного газа. Дело в том, что скорость распространения пламени по перемешанной смеси в присутствии флегматизаторов зависит и от интенсивности передачи тепла из зоны реакции в свежую горючую смесь. Чем ниже теплопроводность смеси, тем меньше скорость распространения пламени. Поэтому флегматизирующая способность нейтральных газов определяется соотношением теплоемкости и теплопроводности –  $c_p/\lambda$ .

Некоторые нейтральные газы увеличивают интенсивность теплоотвода за счет резкого повышения коэффициента теплопроводности газовой смеси  $\lambda$ . По такому механизму прекращения горения действует, например, гелий  $\lambda_{\text{He}} \approx 6 \lambda_{\text{N}_2}$ . Так как при этом интенсифицируется и теплоотвод к свежей горючей смеси, то от введения таких нейтральных газов скорость распространения пламени должна повышаться. Величина  $(C_p/\lambda)$  для CO<sub>2</sub> в 2 раза превышает отношение  $C_p/\lambda$  аргона.

Таким образом, нейтральные газы действуют как по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, так и по механизму прекращения горения теплоотводом на нагревание вводимых нейтральных газов, а также по механизму интенсификации теплоотвода из зоны реакции.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие вещества относят к нейтральным газам?
2. Какие газы относят к химически инертным?
3. В чем различие между инертными газами и нейтральными?
4. Назовите огнетушащие концентрации негорючих газов и области их применения.
5. Назовите механизмы огнетушащего действия негорючих газов.

6. От каких физико-химических характеристик зависит огнетушащая эффективность негорючего газа?
7. Огнетушащая эффективность, каких нейтральных газов выше? Ответ обоснуйте.
8. Для пожаров, каких классов не рекомендуется применять в качестве разбавителя реакционной смеси диоксид углерода?
9. Для пожаров, каких классов не рекомендуется применять в качестве разбавителя реакционной смеси азот?



## Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 N 69-ФЗ «О пожарной безопасности».
2. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
3. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
4. *Марков В.Ф.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров: Учебное пособие для курсантов, студентов и слушателей образовательных учреждений МЧС России / В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, М.П. Миронов, С.Н. Пазникова, Екатеринбург: УрО РАН.2009. – 274 с.
5. *Рашоян И.И.* Физико-химические основы развития и тушения пожара: учеб. пособие / И.И. Рашоян. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 107 с.: обл.
6. *Тимофеева С.С.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. / С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова, Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский, Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.
7. *Бобков С.А.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
8. *Батов Д.В.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров (курс лекций): учебное пособие./ Д.В. Батов, Т.А. Мочалова, Иваново: ООНИ ЭКО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2015. - 124с.
9. *Таубкин С.И.* Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 600 с.
10. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении.- М.:ВНИИПО, 2005.- 456с.

Сторонкина Ольга Евгеньевна  
Мочалова Татьяна Александровна

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ  
И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ**

Учебное пособие  
по специальности 40.05.03 «Судебная экспертиза»

Подготовлено к изданию 29.05.2020 г.  
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 8,4. Заказ № 80

Отделение организации научных исследований  
научно-технического отдела  
Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России  
153040, г. Иваново, пр. Строителей, 33