

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Иркутский государственный технический университет**

**С.С. Тимофеева, Т.И. Дроздова,  
Г.В. Плотникова, В.Ф. Гольчевский**

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

Учебное пособие

**Издательство  
Иркутского государственного технического  
2013**

УДК 614.841

ББК

Т

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ИрГТУ

**Рецензенты:**

начальник ГУ СЭУ ФПС «Испытательная пожарная лаборатория» по Иркутской области В.Ю.Селезнев;

к.т.н., доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ИрГТУ В.В. Малов

Тимофеева С.С., Дроздова Т.И., Плотникова Г.В., Гольчевский В.Ф.

Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.

В учебном пособии изложены особенности пожаров газовых, газонефтяных, нефтяных фонтанов; пожаров жидкостей в резервуарах, открытых пожаров твердых, горючих материалов. Даны понятия динамики развития внутреннего пожара, теплового баланса открытого и внутреннего пожаров, газообмена на открытом и внутреннем пожарах. Приведены примеры расчетов основных параметров пожара.

В учебном пособии рассматриваются способы тушения пожаров газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов, жидкостей, твердых горючих материалов в зависимости от особенностей их горения, приведены примеры расчета основных параметров пожаротушения.

Учебное пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки: 280700 «Техносферная безопасность», магистерская программа «Пожарная безопасность», а также может быть полезен техническим специальностям службам пожарной охраны, а также может быть использовано при проведении пожарно-технической экспертизы.

ISBN

© Тимофеева С.С., Дроздова Т.И.  
Плотникова Г.В. Гольчевский В.Ф., 2012

© Иркутский государственный  
технический университет, 201\_\_

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1. Пожары газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов</b> .....	11
1.1. Понятие затопленной турбулентной газовой струи.....	11
1.2. Механизм стабилизации факела пламени в турбулентной свободной струе горючего газа.....	16
<b>Глава 2. Пожары резервуаров</b> .....	23
2.1. Механизм распространения горения по поверхности жидкости.....	23
2.2. Факторы, влияющие на скорость распространения пламени.....	23
2.3. Факторы, влияющие на скорость выгорания жидкости.....	28
<b>Глава 3. Открытые пожары твердых веществ и материалов</b> .....	36
3.1. Горение твердых веществ и материалов.....	36
3.2. Механизм воспламенения твердых веществ и материалов.....	37
3.3. Коэффициент поверхности горения.....	39
3.4. Горение твердых неметаллических материалов в состоянии невесомости.....	41
3.5. Особенности открытых пожаров твердых горючих материалов.....	43
3.5.1. Пожары на складах лесоматериалов.....	43
3.5.2. Лесные пожары.....	44
3.5.2.1. Лесные пожары в Иркутской области.....	47
3.5.3. Торфяные пожары.....	56
3.5.4. Степные пожары.....	57
<b>Глава 4. Понятие динамики развития внутреннего пожара</b> .....	61
4.1. Основные периоды и фазы развития внутреннего пожара.....	61
4.2. Основные параметры развития внутреннего пожара.....	65
4.3. Расчет основных параметров пожара.....	69
4.3.1. Расчет величины пожарной нагрузки.....	69
4.3.2. Расчет тепловой пожарной нагрузки.....	70
4.3.3. Расчет коэффициента поверхности горения.....	70
4.3.4. Расчет площади внутреннего пожара.....	72
4.3.5. Расчет скорости распространения пожара.....	75
<b>Глава 5. Тепловой и газовый обмен на внутреннем пожаре</b> .....	81
5.1. Температурный режим внутреннего пожара.....	81
5.2. Тепловой баланс внутреннего пожара.....	84
5.3. Пожары, регулируемые нагрузкой и вентиляцией.....	86
5.4. Особенности горения пожарной нагрузки.....	89
5.5. Расчет температуры пожара.....	92

5.6. Особенности газообмена на внутреннем пожаре.....	96
5.7. Понятие нейтральной зоны и факторы, влияющие на ее высоту.....	97
5.8. Расчет интенсивности газообмена.....	102
<b>Глава 6. Предельные явления в горении.....</b>	<b>107</b>
6.1. Пределы горения.....	107
6.2. Тепловая теория потухания.....	109
6.3. Способы предотвращения и прекращения горения.....	110
<b>Глава 7. Прекращение горения на пожарах.....</b>	<b>113</b>
7.1. Механизмы прекращения горения.....	113
7.2. Негорючие газы и химически-активные ингибиторы.....	117
7.2.1. Механизм прекращения горения негорючими газами.....	117
7.2.2. Прекращение горения химически-активными ингибиторами.....	118
7.2.3. Расчет параметров пожаротушения при использовании негорючих газов и химически-активных ингибиторов.....	121
7.3. Пены и порошковые составы.....	129
7.3.1. Пены как огнетушащие вещества.....	129
7.3.2. Расчет необходимого количества пенообразователя для тушения..	133
7.3.3. Порошковые огнетушащие составы.....	134
7.4. Вода как огнетушащее вещество.....	136
7.4.1. Огнетушащие свойства воды.....	136
7.4.2. Механизм прекращения пламенного горения водой.....	139
7.4.3. Коэффициент использования воды.....	140
7.4.4. Расчет параметров пожаротушения при использовании воды.....	142
7.5. Аэрозольные огнетушащие средства.....	144
7.5.1. Применение аэрозольных средств пожаротушения.....	144
7.5.2. Механизм прекращения горения.....	145
<b>Глава 8. Теоретические обоснования основных параметров тушения.....</b>	<b>148</b>
8.1. Графический метод определения критической и оптимальной интенсивности подачи огнетушащего средства.....	148
8.2. Аналитический метод определения критической и оптимальной интенсивности подачи ОС.....	150
8.3. Сравнительная оценка эффективности тушения пожаров.....	152
8.4. Комбинированные средства тушения.....	153
<b>Приложения.....</b>	<b>164</b>
<b>Перечень вопросов для самоконтроля.....</b>	<b>166</b>
<b>Задачи для самоконтроля.....</b>	<b>168</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>175</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Для понимания сущности и специфики процессов, протекающих на пожаре, необходимо уяснить, что горение веществ и материалов (или их совокупности, т.е. материалов строительных конструкций, мебели и т.д.) на том или ином объекте пожара, является неотъемлемым признаком любого пожара независимо от того, протекает горение в пламенном или беспламенном режиме. Началом пожара является момент возникновения горения в очаге.

Горение может возникнуть при наличии трех неотъемлемых элементов: горючего вещества, источника зажигания, благоприятных для инициации горения условий их взаимодействия.

Для установления причины пожара необходимо собрать полную информацию о всех его составляющих, включая помимо самого источника зажигания фактические данные о воспламенившемся материале и условиях взаимодействия горючего материала и источника зажигания. Полученные сведения позволяют 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 (с учетом результатов осмотра места пожара), вида и тепловой мощности источников зажигания, скорости развития горения, от особенностей явлений, сопровождающих горение, от времени возникновения горения, от поведения лиц, имеющих отношение к пожару и т.д.

В большинстве случаев отправной точкой для установления причины пожара является установление места возникновения пожара.

Для несведущих лиц место пожара представляет собой хаотичное нагромождение обгоревших предметов, мебели, оборудования, коммуникаций. На самом же деле система следов на пожаре формируется вполне закономерно в соответствии с законами природы, на проявление которых в конкретных условиях оказывают влияние конструктивные особенности объекта пожара, виды и масса горючего материала, а также действия людей, которые способствовали как возникновению пожара, так и его локализации и ликвидации, т.е. тушению.

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».

Пожар – это стихийно развивающееся горение, не предусмотренное технологическими процессами, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства. Пожары подразделяются на открытые и внутренние, на лесные, торфяные, степные, газовые, газонефтяные и пожары нефтепродуктов. Кроме того пожары классифицируют по зонам: отдельные пожары, массовые и сплошные. Зона отдельных пожаров – это районы, на территории которых возникают возгорания на отдельных участках. Зона массовых и сплошных пожаров – это территория, где возникает такое множество возгораний, что проход и нахождение в ней подразделений без проведения мероприятий по локализации или тушению невозможны, а ведение спасательных работ затруднено. Такие зоны возникают в условиях сплошной застройки, компактности лесных массивов, скопления большого количества горючих материалов. Разновидностью сплошного пожара является огненный шторм. Он возникает в результате горения большого количества горючих материалов, характеризуется наличием воздушной конвергенции. В результате формируется мощный конвективный поток, к которому устремляются воздушные массы со скоростью до 15м/с. Условием возникновения огненного шторма является наличие плотной застройки или растекание горючего материала на площадь до 1000 га., наличие горючего материала на соответствующей площади (в пересчете на древесину около 200кг/м<sup>2</sup>. на площади 1 кв.м.

Горение – это главный и основной процесс на пожаре, отличительными особенностями горения на пожаре от других видов горения являются: склонность к самопроизвольному распространению, сравнительно не высокая степень полноты сгорания, интенсивное выделение дыма, в котором содержатся продукты полного и неполного сгорания.

На пожаре одновременно протекает много различных процессов и явлений. Одни постоянны и присущи всем пожарам (первичные явления)

### ***Открытые и внутренние пожары и их особенности***

На пожаре одновременно протекает много различных процессов и явлений. Одни постоянны и присущи всем пожарам (первичные явления):

1) Горение с выделением в зоне горения тепла и продуктов горения. Горение – это главный и основной процесс на пожаре, отличительными особенностями горения на пожаре от других видов горения являются: склонность к самопроизвольному распространению, сравнительно не высокая степень полноты сгорания, интенсивное выделение дыма, в котором содержатся продукты полного и неполного сгорания.

2) Массообмен, осуществляемый по механизму конвективных газовых потоков, за счёт которых обеспечивается приток воздуха в зону горения и отвод продуктов горения.

3) Теплообмен, т.е. передача тепла из зоны горения в окружающее пространство. Без этого невозможно самопроизвольное продолжение процесса горения на пожаре, его развитие и распространение. Тепло приводит к нарушению механической прочности конструкций, их обрушению, взрыву ёмкостей высокого давления, сосудов и резервуаров с жидкостями и газами. Тепло осложняет обстановку на пожаре и затрудняет действия личного состава.

Эти три процесса взаимосвязаны и взаимообусловлены.

Другие явления, встречающиеся на некоторых пожарах, – это выделение токсичных продуктов разложения, деформация и обрушение конструкций, разрыв стенок резервуаров, взрыв сосудов, выброс горючих жидкостей и т.д. Это так называемые, вторичные явления.

### ***Основные параметры и зоны пожара***

#### Параметры пожара:

Пожары всегда различны и индивидуальны: разнообразны режимы горения (кинетическое и диффузионное, гомогенное и гетерогенное, ламинарное и турбулентное, дефлаграционное и детонационное), разнообразны 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:

1) Продолжительность пожара ( $\tau_n$ ) – время с момента возникновения до полной ликвидации.

2) Площадь пожара ( $F_n$ ) – это площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость.

3) Температура пожара ( $T_n$ ) – это температура пламени для открытого пожара и температура дыма для внутреннего.

4) Линейная скорость распространения пожара ( $v_n$ ) – это скорость распространения горения по поверхности горючего материала за единицу времени. Линейная скорость горения определяет площадь пожара и

зависит от вида горючего, от начальной температуры, способности к воспламенению, интенсивности газообмена. Наибольшей линейной скоростью обладают газы, наименьшей – твёрдые горючие вещества.

5) Интенсивность газообмена ( $J_g$ ) – это количество воздуха, притекающего в единицу времени к единице площади пожара за единицу времени. Различают требуемую и фактическую интенсивность газообмена.

6) Интенсивность или плотность задымления – эти параметры характеризуются ухудшением видимости и степенью токсичности в зоне задымления

7) Теплота пожара ( $Q_n$ ) – это количество тепла, которое выделяется в зоне горения за единицу времени (кДж/с)

$$Q_n = \beta \cdot v_m' \cdot F_n \cdot Q_H,$$

где  $\beta$  - коэффициент недожога;

$v_m'$  - приведенная массовая скорость выгорания, кг/м<sup>2</sup>·с;

$F_n$  - площадь пожара;

$Q_H$  - низшая теплота сгорания кДж/кг.

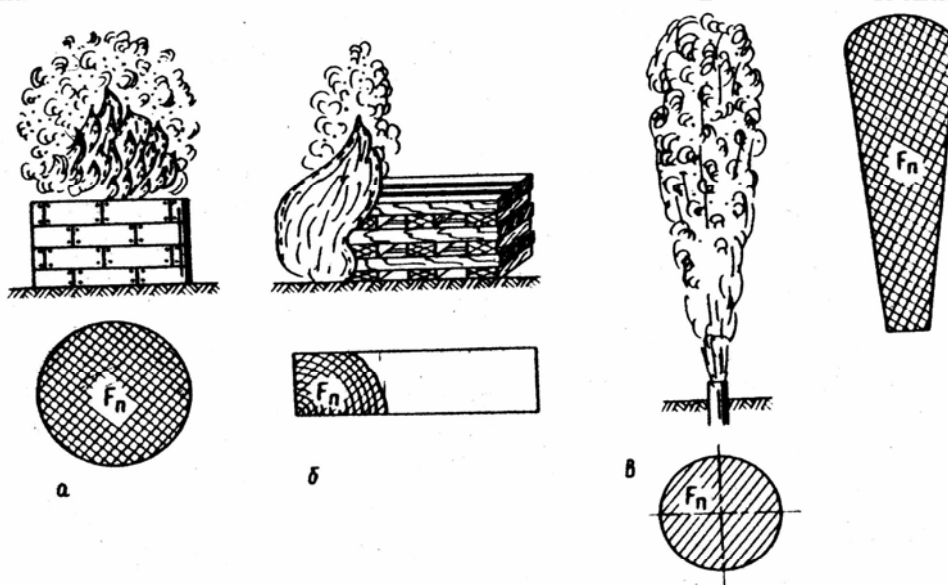


Рис.1. Площадь пожара: а – при горении жидкости в резервуаре; б – при горении штабеля пиломатериалов; в – при горении газонефтяного фонтана

### Зоны пожара

Зона пожара – пространство, в котором происходит пожар и вокруг него, Условно выделяют три зоны:

1) Зона горения – это часть пространства, в которой происходит подготовка горючих веществ к горению и их горение. Зона горения включает в себя объём паров и газов, ограничивается зоной горения и



поверхностью горящих веществ, с которой пары и газы поступают в зону горения. При беспламенном горении зона горения совпадает с поверхностью горения. Иногда зона горения ограничивается конструктивными элементами: стенами зданий, резервуаров. Зона горения является теплогенератором на пожаре, т.к. именно здесь выделяется все тепло и развивается самая высокая температура.

2) Зона теплового воздействия – 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. С распространением зоны горения границы зоны теплового воздействия расширяются и этот процесс повторяется непрерывно. 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. При тушении пожаров необходимо знать границы зоны теплового воздействия. Ближней границей является зона горения, а дальнюю определяют либо по температуре, которая превышает 60-70 °С, т.е. пребывание людей и выполнение боевых действий невозможно, либо по интенсивности теплового потока, где лучистое тепло, воздействуя на незащищенные участки тела человека, вызывает болевое ощущение через короткий промежуток времени. Для внутренних пожаров это время равно 15 с., т.е. интенсивность лучистого потока равна 3500 Вт/м<sup>2</sup>.

$$l_{\text{без}} \approx 1,6H,$$

где  $l_{\text{без}}$  – безопасное расстояние;

$H$  – общая высота горючего материала и пламени.

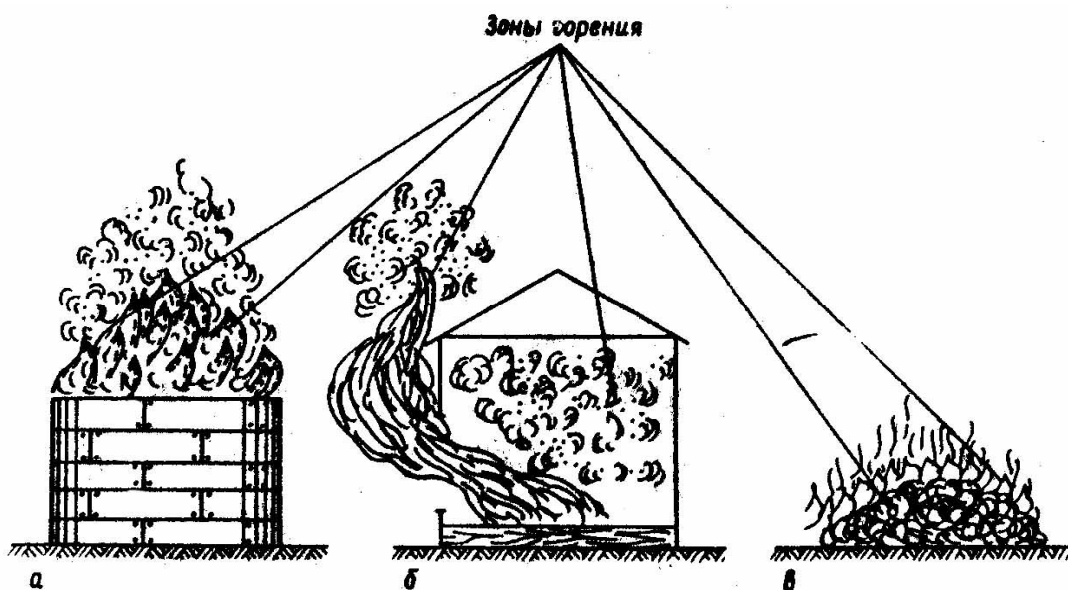


Рис.2. Зоны горения на пожарах: а – при горении жидкости в резервуаре; б – при горении внутри здания; в – при горении угля

3) 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.

К открытым пожарам относятся пожары газовых, газонефтяных, нефтяных фонтанов, складов древесины, хлопка, жидкостей в резервуарах, пожары на ректификационных колоннах, на объектах нефтяной, химической, нефтехимической и газовой промышленности. В открытые пожары могут перейти пожары в зданиях и сооружениях V степени огнестойкости.

Особенностью этих пожаров являются условия газообмена. При этих пожарах не происходит накопление тепла в газовом пространстве зоны горения. Горение происходит в более естественных условиях, неограниченных строительными конструкциями. Газообмен в большей степени зависит от внешних газовых потоков, интенсивности и направления ветра.

Теплообмен осуществляется с неограниченным окружающим пространством. За температуру таких пожаров принимают температуру пламени.

Зона горения определяется распределением горючих веществ в пространстве и формирующими ее газовыми потоками.

Зона теплового воздействия определяется преимущественно лучистым тепловым потоком, так как конвективные потоки уходят вверх и практически не влияют на зону теплового воздействия у поверхности земли. Мощные восходящие конвективные газовые потоки у основания очага горения создают разрежение, в результате возникает интенсивный обдув свежим воздухом, что снижает тепловое воздействие.

# Глава 1

## ПОЖАРЫ ГАЗОВЫХ, ГАЗОНЕФТЯНЫХ И НЕФТЯНЫХ ФОНТАНОВ

Газовыми считаются фонтаны с содержанием горючего газа не менее 95 % по массе, газонефтяными – газа более 50 % и нефти менее 50 % по массе, нефтяными фонтанами – с дебитом нефти более 50 % по массе. Кроме того, газовые, газонефтяные фонтаны разделяют по мощности (дебиту), т.е. расходу: до 2 млн. м<sup>3</sup>/сутки – слабые, средней мощности – от 2 млн. м<sup>3</sup>/сутки до 5 млн. м<sup>3</sup>/сутки, мощные – свыше 5 млн. м<sup>3</sup>

Расход мощных фонтанов может достигать 10-20 миллионов метров кубических в сутки или 10000 тонн нефти в сутки. Высота горящего факела достигает 80-100 метров, интенсивность тепловыделения в таком факеле составляет несколько миллионов киловатт. При авариях на скважинах истечение газа из фонтанной арматуры происходит при высоких перепадах давления, значительно превышающих критическое, т.е. на срезе трубы устанавливается скорость истечения, равная скорости звука. Например, для метана скорость звука равна 400 м/с.

Пожары на открыто фонтанирующих газонефтяных скважинах являются одним из наиболее сложных видов аварий и наносят огромный вред экономике и окружающей среде.

### 1.1 Понятие затопленной турбулентной газовой струи

Газовые и газонефтяные фонтаны являются наиболее интенсивным типом фонтанов, возникающих при авариях на скважинах. В реальных условиях такие струи являются турбулентными. При воспламенении струи газа, вытекающей из скважины, образуется так называемый диффузионный факел, имеющий осесимметричную веретенообразную форму.

При втекании газовой струи из устья скважины снизу вверх она разбавляется воздухом. Вблизи от устья скважины образуется пограничный слой переменного состава. На "бесконечном удалении" от скважины – чистый воздух, в ядре – чистый горючий газ, а в промежуточной зоне находится смесь газов, концентрация которой лежит в области воспламеняемости: от "бедной" на внешней границе струи до "богатой" на внутренней.

В промежутке между концентрационными пределами лежит поверхность, состава близкого к стехиометрическому. Если к такой газовой струе поднести источник зажигания, то смесь вспыхнет. Факел пламени установится именно на этой стехиометрической поверхности.

Возникшие газовые конвективные потоки продуктов горения обеспечат интенсивный приток воздуха к факелу, а потоки продуктов горения расширят верхнюю часть факела.

Снизу, с боков факел будет поджиматься восходящими потоками горючего газа.

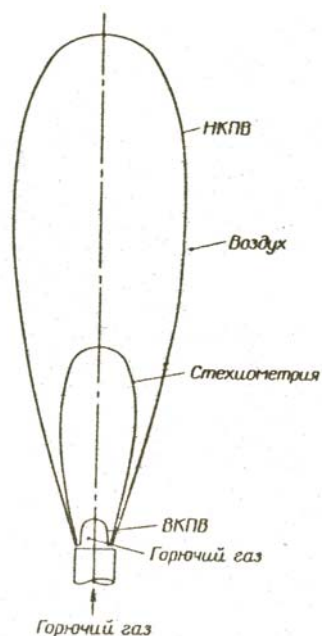


Рис. 3. Структура диффузионного пламени горючего газа

Химические реакции горения протекают в тонком поверхностном слое факела, который в первом приближении можно считать поверхностью, где концентрация топлива и окислителя обращается в нуль. Диффузионный фронт горения не имеет никакой скорости распространения, поэтому самостоятельно удержаться на текущей вверх струе не может. Стабилизация пламени на струе происходит в самой ее нижней части, где реализуется другой механизм горения. При истечении газа из отверстия на начальном негорящем участке поверхности струи образуется турбулентный слой смешения газа и окружающего воздуха. В этом слое концентрация газа в радиальном направлении плавно падает, а концентрация окислителя нарастает. В средней части толщины слоя смешения образуется гомогенная смесь топлива и окислителя с составом, близким к стехиометрическому. При воспламенении такой смеси фронт пламени будет распространяться навстречу потоку, если его скорость будет превышать скорость потока. Когда скорость пламени уравнивается со скоростью потока, то происходит стабилизация фронта пламени на поверхности струи на той высоте, где эти скорости уравнились. Считается, что максимальная скорость распространения пламени навстречу

фонтанирующей со скоростью 300-450 м/с струе газа будет порядка 50 м /с.

Широкое применение горючего газа в промышленности приводит к необходимости организации выбросов большого количества газа при проведении операций транспортирования хранения, переработки, продувки емкостей, кроме того, происходят аварийные выбросы, которые реализуются при разрушении газопроводов или авариях на скважинах. Пожарная опасность газовых выбросов определяется возможностью их воспламенения, устойчивого горения сбрасываемого газа, теплофизическими параметрами пламени и длительностью его воздействия на окружающие объекты.

В зависимости от режимов истечения горючего газа, условий его перемешивания с воздухом и условий воспламенения процесс сгорания облака может развиваться различным образом.

Когда в атмосферу попадает значительное количество горючего газа, а воспламенение запаздывает, тогда облако может сгорать с высокой скоростью, что может привести к образованию ударных волн. После взрыва на месте выброса образуется диффузионный факел.

Если время задержки воспламенения незначительно, тогда образование диффузионного факела не сопровождается взрывом.

При истечении горючего газа из различных газообразных устройств возможно образование двух типов факелов:

- 1) Присопловый факел – факел, который стабилизируется непосредственно у горелки или устья скважины
- 2) Висящий (или оторванный) – стабилизация происходит на некотором расстоянии от устья скважины

Как правило, в результате утечки горючего газа образуется газоздушное облако. Попадание источника воспламенения в область концентраций между НКПВ и ВКПВ приводит к воспламенению смеси.

В окружающую атмосферу вытекает свежий газ и горение происходит в результате взаимной диффузии кислорода и газа в зону горения. Поэтому горение газового фонтана является диффузионным. Горение газового фонтана устойчивое, может длиться неделями и даже месяцами, от метеорологических условий не зависит. Для ликвидации такого пожара необходимо большое количество сил и средств.

Рассматривая факелы газонефтяных фонтанов, можно с некоторыми поправками пользоваться основными закономерностями турбулентных газовых струй, так как при соотношении массы газа к массе нефти, равной примерно единице, соотношение их объемов будет равно примерно 1000. По мере удаления от среза трубы это соотношение будет увеличиваться в десятки раз, т.к. происходит массообмен с окружающей средой. Скорость

движения капель нефти в струе будет равна скорости движения газа. Такую струю можно рассматривать как свободную затопленную турбулентную струю.

Из рис. 3 видно, что существуют три области концентрации: НКПВ, стехиометрическая, ВКПВ. Если рассматривать факел в разрезе, то ясно, что концентрация кислорода и газа в зоне горения падает до нуля, а температура достигает максимума. Продукты горения могут диффундировать как в окружающую среду, смешиваясь с воздухом, так и внутрь факела, смешиваясь с горючим газом. Распространение пламени и воспламенение новых порций газа осуществляется за счет теплопроводности и диффузии горячих продуктов горения.

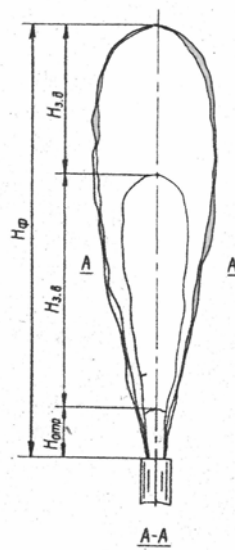


Рис. 4. Структура турбулентной горячей струи газа

Температура газа в ядре постоянных скоростей равна температуре истечения газа. Воспламенение турбулентной струи газа осуществляется по периферии (по кольцевой области), где скорость распространения пламени имеет максимальное значение. По мере удаления от среза трубы зона высоких температур приближается к оси и на некотором расстоянии достигает оси. Это расстояние называется длиной зоны воспламенения ( $H_{з.в.}$ ). Длина  $H_{з.в.}$  зависит от физико-химических свойств газа, от содержания атомов углерода в молекуле, чем больше молекулы, тем выше зона, т.к. должно поступить больше воздуха для горения

(рис. 4).

В зоне догорания происходит догорание отдельных молекул горючего, на которые разбивается струя в результате турбулентных пульсаций. Смешивание здесь происходит за счет молекулярной диффузии, в этой зоне недостаток кислорода, сгорание протекает медленно, что обуславливает значительную длину этой зоны. Длина этой зоны  $H_{з.в.}$  пропорциональна скорости движения газа:

$$\frac{H_{з.в.} d}{d} \approx \frac{W_{II} \cdot \tau_0}{d},$$

где  $W_{II}$  – скорость газового потока.

Фронт горения в турбулентном факеле пламени из-за турбулентных пульсаций горючего, воздуха, продуктов горения получается размытым, раздробленным на отдельные части, неустойчивым. Одним из важных

параметров газового факела является его высота, под которой понимают наблюдаемую визуально высоту ( $H_\phi$ ).

Высота факела является функцией высоты области стехиометрических концентраций ( $H_s$ ) и скорости сброса горючего газа:

$$H_\phi = f(H_s, W_\Pi).$$

Исследования показали, что при истечении горючего газа из отверстий большого диаметра ( $d > 50$  мм) длина факела увеличивается пропорционально диаметру отверстия в степени 0.8:

$$H_\phi \sim d_0^{0.8}.$$

Для метана длину факела можно рассчитать:

$$H_\phi = \frac{120d_0^{0.8}}{1 + 30/W_\Pi},$$

для пропан-бутановой смеси:

$$H_\phi = \frac{200d_0^{0.8}}{1 + 25/W_\Pi}.$$

Установлена зависимость между высотой факела и дебитом газовой скважины:

$$H_\phi = 23V^{0.4},$$

где  $V$  – расход газа, млн. м<sup>3</sup>/сутки.

Эту формулу можно использовать для определения дебита фонтана.

Можно использовать более простую зависимость:

$$V = 0,0025H_\phi^2, \quad \text{т.е. } H_\phi = 20\sqrt{V}.$$

Расход газа является одним из основных параметров, определяющих объемы работ материально-технических средств, необходимых для ликвидации аварии

С увеличением расхода газа высота факела пламени растет медленно, причем, диаметр насадка существенного влияния не оказывает так, при расходе газа 2.2 млн. м<sup>3</sup>/сутки высота факела для насадков диаметром 150, 250 мм составляет 33 м.

Высота пламени у газонефтяных фонтанов несколько выше, чем у газовых. Нефтяные фонтаны с большим дебитом нефти и незначительным содержанием газа имеют небольшую высоту факела пламени, примерно 20-30 м. Пламя газового фонтана имеет светло-желтую окраску.

При пожарах газонефтяных фонтанов вся нефть сгорает в воздухе, пламя имеет оранжевый цвет, иногда горение сопровождается клубами черного дыма.

При пожарах нефтяных фонтанов только незначительная часть нефти успевает испариться и сгореть в воздухе, а большая ее часть выпадает на землю, разливается вокруг устья скважины и продолжает гореть. Нефтяной

фонтан горит темно-оранжевым пламенем с большим выделением черного дыма. Процесс истечения и горения факела сопровождается сильным шумом (ревом).

Максимальный диаметр у верхней части турбулентного, диффузионного факела можно определить:

$$D_{\phi} \approx (0,1 \div 0,15)H_{\phi}.$$

Одной из самых тяжелых аварий является возникновение рассеянного факела, который образуется при разрушении конструкций и загромождении места истечения газа. Такие факелы характеризуются большой устойчивостью, сильно развитой поверхностью и высокой степенью теплового излучения. Тушить такой факел без предварительной ликвидации завала сложно. На рассеянный факел оказывает влияние подвижность воздуха. При скорости ветра 3-7 м/с факел отклоняется от вертикальной оси на 45-60 градусов. Ширина рассеянного факела:

$$D_{\phi} = (0,25 \div 0,5)H_{\phi}.$$

## **1.2. Механизм стабилизации факела пламени в турбулентной свободной струе горючего газа**

Для устойчивого горения необходимо равенство скоростей распространения пламени и встречного газового потока. Необходимое условие:

$$W_{nom} = u_T$$

где  $W_{nom}$  – скорость газового потока;

$u_T$  – скорость распространения пламени.

$u_T$  может достигать нескольких метров в секунду (5-10 м/с), что значительно выше нормальных скоростей распространения пламени. Так как при высоких давлениях скорость потока газа ( $W_{II}$ ) на срезе трубы значительно больше  $u_m$ , то факел пламени отрывается и процесс горения начинается на некотором расстоянии от среза трубы, если же скорость истечения мала, то пламя почти соприкасается с устьем. При увеличении скорости потока высота отрыва горящего факела увеличивается и при некоторой скорости может произойти газодинамический срыв, т.е. самопроизвольное потухание.

При распространении турбулентного пламени газового фонтана на некоторое расстояние от среза трубы формируется гидродинамическая кольцевая область, в которой  $u_T$  равна  $W_{II}$ . Эта область расположена по периферии струи и обеспечивает стабилизацию факела пламени постоянно действующим источником зажигания – зажигающим кольцом.



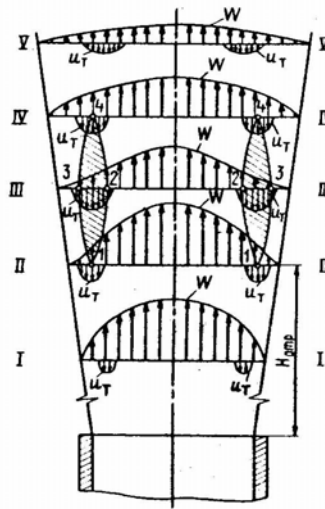


Рис. 5. Схема стабилизации факела пламени газового фонтана

Турбулентная скорость пламени ( $u_T$ ) возрастает от минимального значения на периферии струи (в зоне бедных смесей) до максимального значения в области стехиометрических концентраций, а затем, по мере приближения к оси опять падает до нуля (в зоне богатых смесей).

В сечении I-I струи скорость газового потока  $W_{II}$  значительно превышает турбулентную скорость распространения пламени ( $W_{II} \gg u_T$ ), поэтому, в этом сечении горение газозвушной смеси не происходит.

В сечении III-III  $u_T > W_{II}$ , а на всех остальных участках меньше.

Передними точками зажигания являются точки 1, расположенные в сечении II-II, задними – точки 4, расположенные в сечении IV-IV, т.к. скорости практически равны. Если внести источник зажигания в струю газа ниже уровня II-II, то газ воспламенится, потоком газа пламя будет снесено в сечение II-II, где будет существовать устойчиво при изъятии источника зажигания. Если источник зажигания внести в зону выше сечения IV-IV, то устойчивого горения не будет, т.е. после удаления источника зажигания пламя погаснет.

Оторванный (висящий) факел формируется на некотором расстоянии от устья ( $H_{отр}$ ) в зоне развитого турбулентного потока. Поэтому при атаке на газовый фонтан большое количество воды (до 500 л/с) тратится на орошение поверхности земли вокруг скважины в радиусе 10-15 м для снижения температуры в этой зоне, а также для защиты от теплового излучения личного состава и техники.

Интенсивность излучения компактного газового фонтана в безветрие можно рассчитать по формуле:

$$q = \frac{fQ_n}{4\pi R^2},$$

где  $f$  – коэффициент излучения факела пламени;

$Q_n$  – количество тепла, выделяемого факелом;  
 $R$  – расстояние от центра пламени до рассматриваемой точки на поверхности земли.

Для метана  $f = 0.2$ , пропана – 0.33, других углеводородов – 0.4.  
Установлена эмпирическая зависимость  $f$  от молярной массы:

$$f = 0,048\sqrt{M} \text{ или } f = 0,05\sqrt{M}.$$

Теплота пожара определяется по формуле:

$$Q_n = \beta \cdot Q_H^P V_G,$$

где  $Q_H^P$  – низшая теплота сгорания газа кДж/кг;

$V_G$  – расход (дебит) газового фонтана, м<sup>3</sup>/ч;

$\beta$  – коэффициент недожога.

Стабилизация факела, который образуется прямо на устье скважины (присоплового факела), происходит под влиянием холодной стенки среза горелки на основании факела, а также зависит от условия смешивания.

Характерной особенностью факельного горения является его продолжительность, при этом окружающие объекты оказываются в зоне теплового воздействия, что может вызвать вторичные пожары. Вклад в тепловое излучение вносят как газообразные продукты горения, так и частицы сажи.

Зная величину интенсивности теплового излучения, которое выдерживает личный состав ( $q_{\text{без}}$ ), можно рассчитать предельное расстояние от центра факела, на котором могут работать люди продолжительное время.

$$R = \left( \frac{fQ_n}{4\pi q_{\text{без}}} \right)^{1/2}.$$

При расчетах принимают, что тепловое излучение с интенсивностью в  $5.6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>·ч является безопасным и личный состав может выдержать такие тепловые нагрузки без специальной защиты в течение неограниченного времени:

$$\ell_{\text{без}} = \left[ R^2 - \left( H + \frac{H_{\Phi}}{2} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

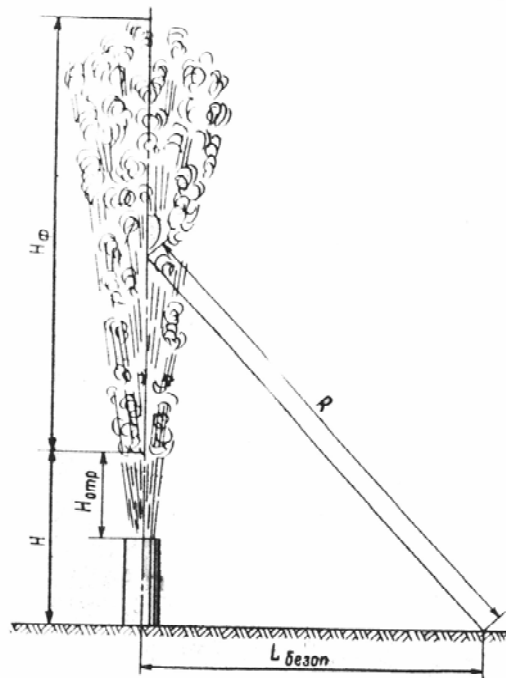


Рис.6. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния до горящего факела газового фонтана

Таким образом, задаваясь величиной допустимого теплового воздействия можно определить расстояние, на котором возможна работа в опасной зоне.

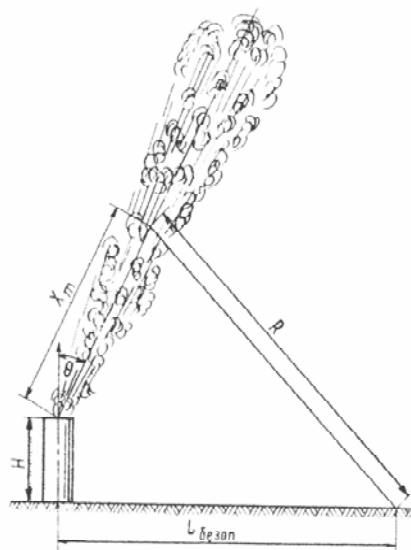


Рис.7. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния для наклонного факела пламени

При сильном ветре пламя факела отклоняется от вертикального положения и зона теплового воздействия имеет форму эллипса.

В этом случае безопасное расстояние от устья скважины в противоположном направлении ветра увеличивается и можно рассчитать по формуле:

$$l_{\text{без}} = \left\{ R^2 - \left[ H + \left( \frac{H_{\phi}}{2} - H \right) \cos \theta \right]^2 \right\}^{1/2} + (X_m - H) \sin \theta .$$

Преобразовав эту формулу можно получить:

$$R = \left( \frac{f Q_H V_{\Gamma}}{4 \pi q_{\text{без}}} \right)^{1/2} ,$$

где  $V_{\Gamma} = 16.7 (H_{\phi})^{2.5}$  – экспериментальная эмпирическая зависимость, м<sup>3</sup>/ч;  
 $q_{\text{без}} = 5.6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>·ч.

Тогда

$$\ell_{\text{без}} = \left[ 1,75 H_{\phi}^{2.5} - \left( H + \frac{H_{\phi}}{2} \right)^2 \right]^{1/2} ,$$

где  $H$  – расстояние от земли до нижней точки факела пламени.

Зависимость интенсивности теплового потока от расхода газа для вертикального факела:

$$q = 50 V^{0.2} .$$

На основании экспериментальных исследований получена зависимость интенсивности теплового потока от расхода газа для рассеянного факела:

$$q = 100 V^{-0.4} ,$$

где  $q$  – интенсивность теплового потока, кДж/м<sup>2</sup>·ч;  
 $V$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с.

Исходя из полученной формулы видно, что увеличение расхода газа приводит к снижению интенсивности теплового излучения, т.е. значительно увеличивается неполнота сгорания газа, увеличивается количество сажи, о чём свидетельствуют периодически возникающие "огненные шары" в пламени.

Важной характеристикой газового фонтана является тепловое напряжение объема факела горения. Под тепловым напряжением понимают количество тепла, выделяющегося в единицу времени в единице объема факела пламени.

Для ламинарного пламени тепловое напряжение будет равно

$$\left[ \frac{Q_{\Pi}}{V} \right] = \frac{V_M F Q_H}{V} .$$

Приняв, что форма пламени коническая, можно определить площадь поверхности и объём:

$$F = \pi r H_{\phi} = \pi r \sqrt{r^2 + \ell^2} ,$$

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 \ell , \text{ где}$$

$\ell$  – длина образующей конуса;

$H$  – высота факела;

$r$  – радиус горелки;

$$u_m = u_T \cdot \rho;$$

$$r = u_m \cdot \tau;$$

$$\ell = V_n \cdot \tau,$$

тогда формула для расчета теплового напряжения будет выглядеть:

$$\left[ \frac{Q_{II}}{V} \right]_{\max} = \frac{3Q_n \cdot u_T \cdot \rho \sqrt{V_{II}^2 + u_T^2}}{RV}.$$

Для двух горелок различных диаметров при одинаковой скорости смеси в них, считая, что нормальная скорость есть величина постоянная, тепловые напряжения объема факела обратно пропорциональны радиусу горелки:

$$\left[ \frac{Q_{II}}{V} \right]_1 : \left[ \frac{Q_{II}}{V} \right]_2 = r_2 : r_1.$$

Это говорит о том, что с уменьшением радиуса горелки увеличивается поверхность пламени, которая приходится на единицу объема, что приводит к увеличению теплового напряжения

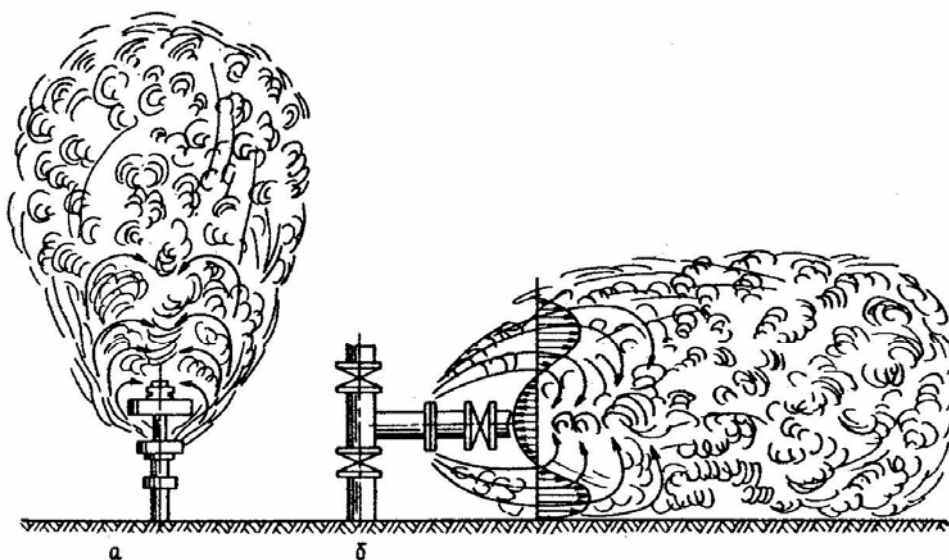


Рис.8. Виды факелов пламени распыленных газовых фонтанов  
а – вертикальный; б – горизонтальный.

Если в устье скважины находится буровое оборудование, в этом случае фронт пламени имеет развитую поверхность горения, что увеличивает тепловое напряжение факела пламени. При этом факел имеет незначительную длину и большой диаметр. При встрече фронта с

арматурой за плохо обтекаемыми телами образуются разрежения, вызывающие циркуляцию мощного потока высоко нагретых продуктов горения. Факел принимает вид полого расходящегося конуса, в котором зажигание осуществляется как изнутри, так и по наружной поверхности. В таких фонтанах горение является устойчивым. При тушении такой фонтан приводят в компактный, а потом тушат.

Для тушения газовых фонтанов в Краснодарском крае разработана, изготовлена и используется турбореактивная установка. Время тушения исчисляется минутами.

## Глава 2 ПОЖАРЫ РЕЗЕРВУАРОВ

### 2.1. Механизм распространения горения по поверхности 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, нефтепродуктов, технологические режимы эксплуатации, а также климатические и метеорологические условия. Взрыв в резервуаре 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 ВКПВ. 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. Синее-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. При хранении нефти и нефтепродуктов в условиях низких температур возможно зависание понтонов или плавающей крыши при откачке продукта из резервуара, что может привести к падению их с последующим возникновением пожара.

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

Над поверхностью жидкости всегда существует паровоздушная смесь, которая в состоянии равновесия характеризуется давлением насыщенных паров.

После того, как температура жидкости достигает температуры воспламенения (это минимальная температура жидкости, при которой пары образуются с такой скоростью, что происходит их воспламенение от источника зажигания и устанавливается стационарное горение) происходит воспламенение паровоздушной смеси и устанавливается пламя, которое будет с определенной скоростью распространяться по поверхности жидкости.

Распространение пламени происходит в результате теплопередачи излучением, конвекцией и молекулярной теплопроводностью от зоны пламени к поверхности зеркала жидкости.

Основную роль играет теплоизлучение от пламени. Согласно закону Стефана-Больцмана интенсивность лучистого потока равна:

$$q_{л} = \varepsilon_0 \cdot \sigma (T_{г} - T_0)^4,$$

где  $q_{л}$  – интенсивность лучистого потока, кВт/м<sup>2</sup>;

$\varepsilon_0$  – степень черноты пламени (0.75-1.0);

$\sigma$  – const Стефана Больцмана, равная  $5.7 \cdot 10^{-11}$  кДж/м<sup>2</sup>·с·к<sup>4</sup>;

$T_{г}$  – температура пламени, К;

$T_0$  – температура среды, К.

Тепло, излучаясь во все стороны, частично поступает к поверхности жидкости, прогревая ее. При этом скорость испарения растет, образуется паровоздушная смесь, и, когда ее концентрация превысит  $C_H$ , произойдет воспламенение от источника зажигания, фронт пламени переместится. Переместившись, пламя прогревает следующий участок и т.д.

Если площадь горючей жидкости достаточно велика, а воспламенение произошло над частью поверхности, то пламя будет быстро распространяться со скоростью 5-6 см/с на нижнем или верхнем концентрационном пределе (если концентрация пара над поверхностью равна  $C_H$  или  $C_B$ ) и со скоростью 45-50 см/с для паров с концентрацией, равной стехиометрической. Например, объём резервуара 10000 м<sup>3</sup>, диаметр равен 30 м, а воспламенение произошло у одного из бортов, то пламя достигнет противоположный борт за  $\approx 1$  мин.

Т.о. скорость распространения пламени по поверхности – это путь, пройденный пламенем за единицу времени. Она определяется скоростью прогрева поверхности жидкости, т.е., скоростью образования паровоздушной смеси.



## 2.2. Факторы, влияющие на скорость распространения пламени

На скорость распространения пламени влияют:

### 1. Природа жидкости

Основное влияние оказывают температура вспышки и теплота испарения, чем больше их значения, тем более длительное время необходимо, чтобы образовалась смесь с концентрацией больше  $C_H$ , а значит, скорость распространения пламени будет ниже. С увеличением молярной массы температура вспышки ( $Q_{всп}$ ) возрастают, а значит, скорость распространения пламени падает.

### 2. Начальная температура жидкости ( $t_0$ )

С увеличением  $t_0$  скорость распространения пламени увеличивается. Когда начальная температура достигает температуры вспышки, скорость пламени резко возрастает.

В закрытых сосудах по мере дальнейшего повышения температуры, (выше  $t_{cm}$  соответствующей стехиометрической смеси), скорость распространения пламени будет снижаться вплоть до верхнего температурного предела, при этой температуре распространение пламени уже невозможно из-за недостатка кислорода.

Если резервуар открытый, то концентрация паров по высоте будет разная: у поверхности жидкости она будет максимальной, а по мере подъема над поверхностью она будет снижаться. Значит, в открытом резервуаре при любой начальной температуре жидкости будет область, в которой концентрация паров будет равна  $C_{ст}$ , т.е., над поверхностью жидкости пламя будет распространяться с максимальной скоростью при концентрациях пара  $\approx C_{ст}$ . Фронт пламени будет расположен у поверхности. Увеличение начальной температуры приведет к увеличению скорости распространения пламени.

При увеличении начальной температуры выше  $t_{cm}$ , скорость пламени будет постоянной, равной максимальной, которая наблюдается при стехиометрических концентрациях. Таким образом, изменение начальной температуры жидкости в открытой емкости в широком диапазоне, вплоть до  $t_{кин}$ , может привести к изменению скорости пламени от мм/с до 3-4 м/с, т.е., наибольшая скорость пламени будет при  $t_{ст}$ , а с увеличением температуры будет увеличиваться расстояние от поверхности до области стехиометрических концентраций, но скорость распространения пламени будет оставаться постоянной. Это надо иметь в виду, если возникает опасность подсоса воздуха в закрытую емкость в случае ее разгерметизации.

После воспламенения жидкости и распространения пламени по ее поверхности устанавливается диффузионный режим горения. Структура

диффузионного пламени при горении жидкостей такая же, как при горении газового факела. Разница в том, что поступающие в окружающую среду пары не имеют большого запаса кинетической энергии, поэтому смешивание происходит за счёт конвективной и молярной диффузии. Образовавшиеся продукты сгорания устремляются вверх, а их место занимает воздух. Интенсивность теплового потока возрастает, пламя приобретает форму конуса с основанием внизу. Процесс выгорания характеризуется удельной массовой ( $m$ ) и линейной ( $v_{л}$ ) скоростями выгорания:

– массовая скорость выгорания – это количество жидкости, выгорающей за единицу времени с единицы поверхности,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;

– линейная скорость – расстояние, на которое перемещается уровень зеркала жидкости в единицу времени за счет ее выгорания,  $\text{м}/\text{с}$ .

Эти две скорости связаны между собой:

$$m = v_{л} \cdot \rho,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

После воспламенения температура жидкости на поверхности повышается от температуры воспламенения до  $t_{кин}$ , происходит формирование прогретого слоя. В этот период времени скорость выгорания жидкости постепенно повышается, возрастает высота факела пламени в зависимости от диаметра резервуара и вида горючей жидкости. После  $\approx 10$  мин горения наступает стабилизация, скорость выгорания становится неизменной. При горении жидкостей устанавливается скорость выгорания, которая зависит от термодинамических параметров жидкости и от условий диффузии кислорода и паров в зону горения.

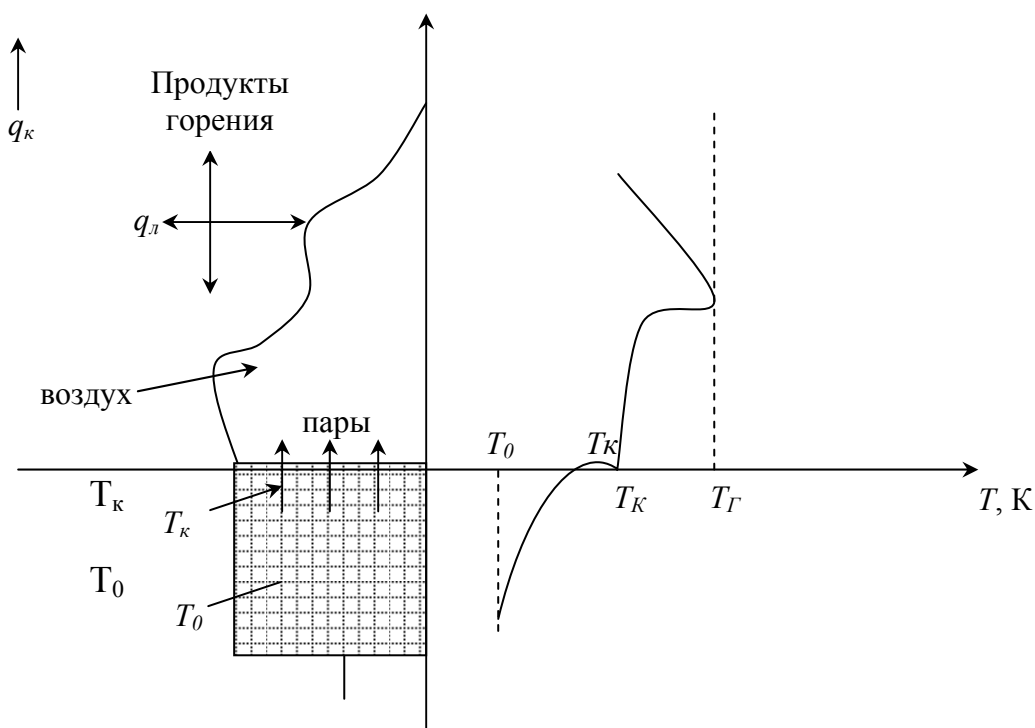


Рис. 9. Распределение температур при горении жидкостей

Между зоной горения и поверхностью жидкости устанавливается тепло-, массообмен. Часть теплового потока, который поступает к поверхности жидкости ( $q_0$ ), затрачивается на ее нагрев до  $t_{кип}$  и на испарение жидкости ( $q_k$  и  $q_{исп}$ ), тогда:

$$\begin{aligned} q_k + q_{исп} &= q_0; \\ q_k &= c_p \rho v_{nc} (T_k - T_0); \\ q_{исп} &= \rho \cdot v_l \cdot Q_{исп}, \end{aligned}$$

где  $c_p$  – теплоемкость, кДж/кг · К ;  
 $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v_{nc}$  – скорость роста прогретого слоя, м/с;  
 $v_l$  – линейная скорость выгорания, м/с;  
 $Q_{исп}$  – теплота парообразования, кДж/кг;  
 $T_k$  – температура кипения жидкости, К.

Считая, что  $v_{nc} = v_l$ , можно получить:

$$q_0 = \rho \cdot v_l [c_p (T_k - T_0) + Q_{исп}].$$

Из этой формулы видно, что интенсивность теплового излучения зависит от скорости выгорания, которая, в свою очередь, связана со скоростью испарения и зависит от количества тепла, необходимого для парообразования.

В момент установления процесса выгорания температура поверхности жидкости резко возрастает до  $t_{кип}$  и потом остается неизменной. Это справедливо только для индивидуальных жидкостей.

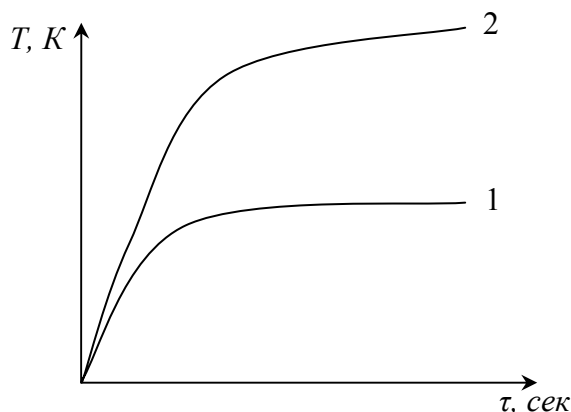


Рис.10. Изменение температуры поверхности жидкости при горении  
 1 – этиловый спирт; 2 – бензин

Если горят сложные жидкости (нефть, бензин), то происходит процесс, подобный фракционной перегонке. Сначала происходит испарение легкокипящих фракций, затем более высококипящих. Этот

процесс сопровождается постепенным (квазистационарным) повышением температуры на поверхности (рис. 10).

По большому счету, квазистационарный процесс можно представить как ступенчатый, т.е. выгорает легкая фракция, процесс стабилизируется, выгорает следующая, температура повышается и стабилизируется и т.д.

### 2.3. Факторы, влияющие на скорость выгорания жидкости

#### 1. Природа жидкости

Из уравнения для  $q_0$  можно вывести значение для  $m$  – массовой скорости выгорания:

$$q_0 = \rho \cdot v_l [c(T_{кин} - T_0) + Q_{исп}],$$

$$\text{т.к. } v_l = \frac{m}{\rho}, \text{ то } m = \frac{q_0}{c \cdot (T_{кин} - T_0) + Q_{исп}}.$$

Из этой формулы видно, что на скорость выгорания оказывает влияние интенсивность теплового потока  $q_0$ , который поступает от пламени к поверхности жидкости, а также теплофизические характеристики:  $T_{кин}$ ,  $Q_{исп}$ , теплоемкость. Интенсивность теплового потока будет тем больше, чем больше степень черноты пламени. Например, при горении нефти  $\varepsilon \approx 1$ , а при горении этилового спирта значительно меньше, значит, и испарение нефти будет происходить интенсивнее, чем этилового спирта, так как:

$$Q_l = \varepsilon_0 \sigma \cdot (T_{пл})^4,$$

где  $\varepsilon_0$  – степень черноты пламени (0.75-1.0);

$\sigma$  – коэффициент Стефана Больцмана, равен  $5.7 \cdot 10^{-11}$  кДж/м<sup>2</sup>·с·к<sup>4</sup>;

$T_{пл}$  – температура пламени, К.

#### 2. Начальная температура жидкости

С увеличением начальной температуры жидкости скорость выгорания увеличивается, т.к. затраты тепла на нагрев поверхности жидкости уменьшаются.

#### 3. Диаметр резервуара

Эта зависимость сложная и условно может быть разделена на три области:

– в первой – по мере увеличения диаметра резервуара от мм до 10 см скорость выгорания резко снижается;

– во второй – при увеличении диаметра до  $d \approx 1.3$  м она возрастает;

– в третьей –  $d > 1.3$  м, скорость выгорания постоянна и не зависит от диаметра.

Т.к. в практической деятельности, в основном, диаметры резервуара больше 1.3 м, то первые две области представляют чисто исследовательские интересы.

Уменьшение скорости выгорания связано с тем, что по мере роста диаметра меняется характер подвода тепла от зоны пламени к жидкости. Количество тепла, которое поступает к поверхности, прямо пропорционально площади поперечного сечения резервуара, а количество тепла, поступающего за счет теплопроводности прогретых стенок, пропорционально периметру сосуда. Тогда доля тепла, поступающего от стенок, к теплу, поступающему за счет излучения, будет пропорциональна отношению периметра к площади поперечного сечения резервуара:

$$\frac{q_{cm}}{q_0} \approx \frac{4}{d}, \text{ т.к. } \frac{\pi d}{\frac{\pi d^2}{4}} \approx \frac{4}{d}.$$

Т.е. с ростом диаметра теплоотвод от стенок снижается и скорость выгорания падает.

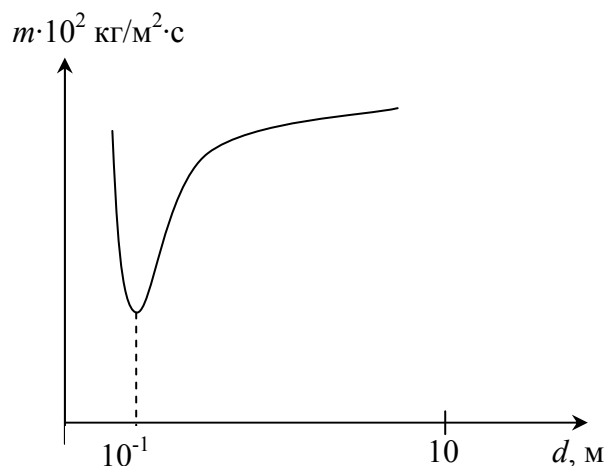


Рис. 11. Зависимость скорости выгорания от диаметра резервуара

Из рис. 11 видно, что с увеличением диаметра больше 0.1 м повышается количество тепла, поступающего от пламени к поверхности жидкости за счет того, что ламинарный режим горения переходит в турбулентный. Пламя при этом меняет свою форму в пространстве, в результате увеличивается интенсивность теплового потока  $q_0$ .

При увеличении диаметра больше 1.3 м устанавливается развитый турбулентный режим, величина теплового потока от пламени стабилизируется и скорость выгорания практически не изменяется.

#### 4. Влияние уровня жидкости в резервуаре

С понижением уровня жидкости происходит снижение скорости выгорания, вплоть до прекращения горения, в связи с тем, что подвод воздуха, необходимого для горения, непосредственно во внутрь резервуара невозможен. При понижении уровня происходит удаление зоны пламени от поверхности жидкости. Величина лучистого потока к поверхности снижается, а значит, снижается скорость выгорания жидкости, вплоть до затухания. Для резервуаров большого диаметра предельная глубина ( $H_{np}$ ), при которой происходит затухание, очень большая: для резервуаров  $d=5$  м  $H_{np}=11$  м, а при  $d=11$  м –  $H_{np}$  около 35 м.

По мере снижения уровня жидкости в резервуаре скорость выгорания уменьшается, и изменение уровня жидкости с течением времени можно описать уравнением:

$$H = K\tau^n,$$

где  $H$  – уровень жидкости, м;

$K$  – коэффициент пропорциональности;

$\tau$  – время, с;

$n$  – показатель, колеблющийся от 0.55 до 0.75.

#### 5. Влияние влажности жидкости

Содержание влаги понижает скорость выгорания жидкости вследствие дополнительных затрат тепла на ее испарение в результате флегматизирующего влияния паров воды в газовой зоне. Все это приводит к снижению температуры пламени, а значит, уменьшается его излучательная способность. Следует отметить, что скорость выгорания влажной жидкости может увеличиваться в зависимости от температуры кипения жидкости (рис. 12).

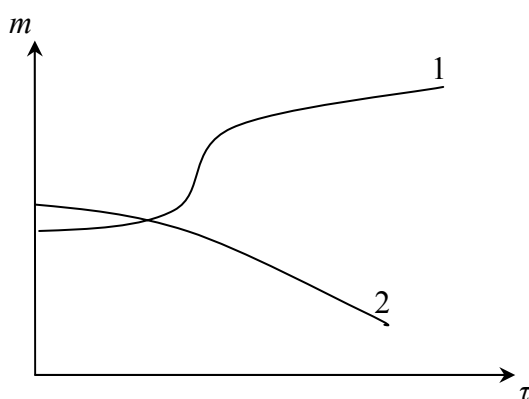


Рис. 12. Изменение скорости выгорания влажных жидкостей при горении:  
1 –  $t_{кип} > 100$  °C; 2 –  $t_{кип} < 100$  °C

Если температура кипения горючей жидкости меньше  $t_{кип}$  воды, то горючее выгорает, а смесь обогащается водой, скорость выгорания снижается и горение прекращается.

Если температура кипения жидкости больше  $t_{кип}$  воды, то сначала испаряется влага, концентрация ее снижается, скорость выгорания жидкости возрастает, вплоть до скорости горения чистого продукта.

#### 6. Влияние скорости ветра

Как правило, повышение скорости ветра увеличивает скорость выгорания жидкости, т.к. при увеличении силы ветра процесс смешивания увеличивается, температура пламени увеличивается, и пламя при этом приближается к поверхности. Все это повышает интенсивность теплового потока, поступающего на нагрев и испарение жидкости, что приводит к росту скорости выгорания. Если скорость ветра большая, то пламя может срываться, что приведет к прекращению горения. Были случаи, когда срыв пламени происходил при скорости ветра 22 м/с.

#### 7. Влияние концентрации кислорода

Если концентрация кислорода меньше 15 % ,то большинство жидкостей гореть не могут. Если концентрация кислорода растет выше этого предела, то скорость выгорания возрастет. В атмосфере с избытком кислорода наблюдается горение жидкости с большим выделением сажи и при этом интенсивно кипит жидкая фаза. Для таких жидкостей (многокомпонентных) как бензин, керосин с увеличением содержания кислорода температура на поверхности жидкости растет.

### ***Механизм прогрева жидкости в глубину***

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих развитие пожара в резервуаре, является его тепловой режим. В зависимости от физико-химических свойств горючей жидкости возможен различный характер распределения температур в объеме жидкости

После воспламенения температура на поверхности жидкости быстро возрастает.

Для индивидуальных жидкостей она близка к температуре кипения, а для нефтепродуктов она выше температуры кипения. Это связано с тем, что в поверхностном слое происходит разгонка жидкости с выходом более летучих фракций.

Поле температур в слое горючей жидкости по её толщине и в горизонтальной плоскости неравномерно.

Экспериментально установлено, что распределение температур в глубину может быть двух типов. В одном случае передача тепла осуществляется теплопроводностью и это приводит к тому, что жидкость прогревается на небольшую глубину (2-5 см). Температура в прогретом

слое быстро понижается с увеличением расстояния от поверхности жидкости:

$$t=t_0+(t_n-t_0)^{-k\sigma},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;

$\sigma$  – расстояние от поверхности;

$t$  – температура жидкости на расстоянии;

$t_0$  – начальная температура;

$t_n$  – температура на поверхности.

Если жидкости горят в больших резервуарах, то характер прогрева существенно меняется. При горении возникает целый слой, толщина которого растет во времени, а температура в любой точке этого слоя одинакова и равна температуре на поверхности. Такой слой называется гомотермическим. Под этим слоем температура быстро падает до начальной температуры жидкости. Толщина прогретого слоя увеличивается с течением времени.

Толщина прогретого слоя определяется:

$$\sigma = \sigma_T (1 - e^{-\mu\tau}),$$

где  $\sigma$  – толщина слоя;

$\tau$  – время от начала формирования слоя;

$\mu$  – коэффициент пропорциональности;

$\sigma_m$  – толщина прогретого слоя.

Такое распределение температур, которое называется распределением температур II рода, наблюдается при определенных условиях, но чаще всего это наблюдается при горении бензина, сырой нефти, масел, мазута.

При горении жидкостей, у которых  $t_{kun}$  высокая, температура в глубину распределяется по первому типу. При горении керосина, дизельного топлива индивидуальных жидкостей значение температуры экспоненциально снижается от температуры кипения на поверхности до температуры хранения в глубинных слоях.

#### Механизм формирования прогретого слоя

Во время горения от пламени, прилегающего к стенке резервуара, нагревается жидкость, которая прилегает к стенке. При условии, что температура стенки выше температуры кипения жидкости, жидкость закипает у борта. За счёт конвективных потоков тепло переносится вглубь жидкости. За счёт этого тепла начинает прогреваться тот участок стенки, который прилегает к прогретому слою жидкости. На этом участке стенки тоже начинается кипение жидкости. Этот процесс продолжается до тех пор, пока потери тепла через стенки не станут превышать подвод тепла со стороны пламени. Если охлаждать стенки резервуара, то прогретого слоя не образуется.



Линейные скорости прогрева и выгорания нефти и нефтепродуктов во многом зависят от скорости ветра, обводненности продукта, характера обрушения крыши, организации тушения. С увеличением скорости ветра до 8-10 м/с скорость выгорания горючей жидкости возрастает на 30-50%.

#### Вскипание и выбросы

Горение нефти и нефтепродуктов в резервуарах может сопровождаться вскипанием и выбросами.

Вскипание и выбросы в процессе горения жидкостей представляют большую опасность, т.к. внезапно выброшенная горящая жидкость может покрыть большую площадь вблизи очага горения вместе с находящимися на ней людьми, строениями и пожарной техникой. Однако, выброс, имеющий характер взрыва, – явление сравнительно редкое чаще бывает более или менее спокойное переливание нефти через борт резервуара, так называемое вскипание жидкости.

Установлено, что вскипание и выброс не происходят при горении керосина, дизельного топлива, бензина. Считается, что явления вскипания и выбросов тесно связаны с наличием воды, которая всегда содержится в том или ином количестве в самой нефти или на дне резервуара.

Кипение – это процесс парообразования, происходящий в объёме жидкости. Для кипения характерно образование большого количества пузырьков пара, зарождающихся на стенках сосуда и на дне. Пузырьки зарождаются на центрах парообразования, которые представляют собой пылинки, пузырьки газов. При нагревании происходит испарение внутрь пузырьков, давление пара внутри пузырька увеличивается и становится равным внешнему давлению. В этот момент пузырёк пара отделяется и всплывает, а на его месте возникает следующий.

Если центры парообразования удалить, то кипение жидкости не возникает, даже если её нагреть выше температуры кипения. В таком состоянии жидкость называется перегретой. Если внести примесь, то произойдёт бурное вскипание, которое носит взрывной характер.

Зародыши паровой фазы могут возникнуть и внутри самой жидкости, если она перегрета достаточно сильно. В этом случае вскипание носит взрывной характер. Аналогичное явление наблюдается при горении сырой нефти и нефтепродуктов.

Температура прогретого слоя нефти может достигнуть 300 °С. Через некоторое время прогретый слой нефти достигает подстилающего слоя воды, вызывая её прогрев. И если на поверхности раздела нефть – вода или внутри самой воды недостаточно центров парообразования, то вода может нагреться до температуры, значительно выше температуры кипения. Как только в перегретой воде возникнут самопроизвольные зародыши паровой фазы, произойдёт вскипание воды с выделением большого количества

пара, который выбросит находящуюся над водой горящую нефть. Возможны колебания границы между горячей и холодной зоной жидкости, что также может вызвать появление центров парообразования. Перемешивающее действие пузырьков делает температуру и состав жидкости достаточно однородными. Нагретая зона в сырой нефти растет со скоростью 8-15 м/мин, а в отдельных случаях до 30м/мин. При достижении нагретой зоной слоя воды вскипание последней начинается не мгновенно, а через какой-то промежуток времени, в течение которого будет нагреваться самый нижний слой нефти и слой воды за счет теплопроводности. Температура гомотермического слоя зависит от температуры окружающей среды, давления, состава нефти, геометрических размеров резервуара.

Выбросы наблюдаются при горении только нефти и мазута, т.е. они прогреваются вглубь весьма интенсивно, и температура прогретого слоя всегда выше 100 °С. Керосин и дизельное топливо прогреваются медленно и не образуют прогретого слоя.

Если в резервуаре нет подстилающего слоя воды, а вода распределена в массе нефти, то при нагревании вследствие того, что уменьшается вязкость верхнего слоя нефти, капли воды опускаются вглубь и постепенно накапливаются там, где вязкость нефти сравнительно велика. Одновременно, капли воды нагреваются и закипают. Пары воды сильно вспенивают нефть, которая переливается через борт резервуара, т.е. происходит вскипание нефти. Чтобы рассчитать время от начала горения до выброса, надо знать толщину слоя нефти и скорость её прогрева. Но выброс легко предупредить, удалив подстилающий слой воды.

Обычно выбросу предшествуют внешние признаки: усиление горения, изменение цвета пламени, усиление шума при горении, могут наблюдаться отдельные потрескивания, вибрация стенок резервуара. Выброс, как правило, носит пульсирующий характер, интенсивность его нарастает в самом процессе выброса. Толщина слоя донной воды на мощность выброса влияния не оказывает

Время выброса рассчитывать необходимо, если нет возможности слива воды. Признаками начала выброса являются вибрации стенок резервуара, сопровождающиеся шумом и возрастанием размеров факела пламени. При возникновении выброса высота пламени увеличивается до 12-15 м при диаметре резервуара 1-2м, т.е. не менее чем в 7раз. Горящие капли летят в стороны на расстояние до 5м, т.е. на расстояние до 3 диаметров резервуара. Масштабы пожара при этом разрастаются. Вскипание возникает гораздо раньше выброса. Основным признаком начала вскипания является увеличение размера факела пламени. В некоторых случаях перед началом вскипания возникает сильный шипящий

шум, а также вскипание может начаться при подаче на поверхность горячей жидкости воды или пены.

Следовательно, большое значение приобретает оперативность при тушении горячей нефти в резервуарах.

Анализ пожаров и крупномасштабных экспериментов показывает, что продолжительность процессов выброса колеблется от 3÷10 мин. Затянувшиеся выбросы являются результатом одновременного соприкосновения прогретого слоя нефтепродукта с водой вследствие обрушения и деформации конструкций резервуаров, т.к. прогрев происходит неравномерно. Выброс носит пульсирующий характер, увеличение объёма факела и его высоты происходит в процессе выброса. Толщина слоя воды на выброс влияния не оказывает.

Признаки выброса: усиление горения, изменение цвета пламени, увеличение шума, отдельные потрескивания и вибрация стенок.

Время выброса можно рассчитать по формуле:

$$\tau = (H - h)(W + v + V),$$

где  $\tau$  – время с начала пожара до выброса, ч;

$H$  – высота слоя нефти в резервуаре до начала пожара, м;

$h$  – высота слоя водяной подушки, м;

$v_n$  – линейная скорость выгорания нефти, м/ч;

$v_{лс}$  – скорость прогрева нефти, м/ч;

$V$  – скорость понижения уровня жидкости вследствие откачки, м/ч.

Время выброса может не совпадать с расчётным из-за вскипания жидкости в результате пенной атаки, например, при пожаре резервуара РВС–7000 выброс произошел через 24 часа, вместо расчётных 14 часов (г. Батуми).

На образование гомотермического слоя значительное влияние оказывает деформация стенок резервуара. Выброс может произойти при скоплении не донной воды, а, например, на плавающей крыше.

При пожаре в резервуаре возможно образование карманов, которые могут иметь различную форму. Они могут образоваться как на стадии возникновения в результате перекоса понтона, так и в процессе развития пожара при деформации стенок. Устойчивость горящего резервуара зависит от организации действий по его охлаждению. При отсутствии охлаждения резервуар деформируется в течение 5-15 минут до уровня разлива горючей жидкости.

При интенсивном охлаждении водой скорость формирования гомотермического слоя резко снижается.

## **Глава 3**

### **ОТКРЫТЫЕ ПОЖАРЫ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

Твердые горючие вещества и материалы (ТГМ) широко распространены в промышленности и быту. Наряду с материалами естественного происхождения, широко применяются полимерные материалы. Большая проблема во всем мире, нерешенная до настоящего времени, – это их горючесть. Возгорание таких материалов, как рубероид, различной кабельной продукции, поролон и др. приводит к поступлению в воздух токсичных продуктов деструкции полимерных материалов с выделением фосгена, хлористого водорода, цианистого водорода, хлорированных и ароматических углеводородов, относящихся к веществам общеядовитого действия. Изучение механизма возникновения и развития пожаров является необходимым условием для разработки мер по предотвращению или тушению пожаров.

#### **3.1. Горение твердых веществ и материалов**

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 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).

Для некоторых ТГМ переход в газовую фазу протекает, минуя процесс плавления. В результате может произойти разложение твердого вещества без остатка или с негорючим остатком. Без остатка разлагается нафталин, уротропин, а с остатком древесина, торф, сланцы, т.е. при горении твердых

материалов часть тепла, поступающего от пламени, расходуется на плавление и разложение.

Тепло- и массообмен для ТГМ можно записать в следующем виде:

$$q_0 = \nu_m [c_p \cdot (T_{пл} - T_0) + Q_{пл} + c_p^1 \cdot (T_k - T_{пл}) + Q_{исп} + Q_p + Q_{т.о}],$$

где  $\nu_m$  – массовая скорость выгорания, кг/м<sup>2</sup>·с;

$q_0$  – интенсивность теплового потока, поступающего от зоны пламени к поверхности твердого вещества, Вт/м<sup>2</sup>;

$c_p, c_p^1$  – теплоемкость твердой фазы и расплава, кДж/кг·К;

$Q_{пл}, Q_{исп}, Q_p$  – теплота плавления, испарения и разложения, кДж/кг;

$Q_{т.о}$  – теплота, пошедшая на нагрев твердого остатка, кДж/кг;

$T_k, T_{пл}$  – температура кипения и плавления вещества, К;

$T_0$  – начальная температура, К.

Для твердых веществ переход в газообразную фазу в большинстве случаев является эндотермическим, однако, есть такие вещества, у которых этот процесс сопровождается экзотермическим эффектом, т.е. можно сказать, что хотя и есть сходство между горением твердых и жидких веществ, но все-таки, это значительно более сложный процесс.

Процессы плавления, испарения, термического разложения определяют скорость распространения пламени по поверхности, скорость выгорания и пиролиза, скорость дымообразования.

При повышении температуры твердого вещества происходит разрыв химических связей с образованием более простых компонентов. Термическое разложение протекает со скоростью, экспоненциально возрастающей с увеличением температуры. Разложение зависит от множества факторов: вида твердого вещества, температуры пиролиза, скорости изменения температуры в течение времени, размеров образца, его формы, степени распада, находится ли образец в контакте с продуктами разложения или они успевают удаляться из зоны горения.

### 3.2. Механизм воспламенения твёрдых веществ и материалов

При контакте твердого вещества с источником зажигания возникает теплообмен. В реальных условиях могут иметь место три вида теплообмена: конвекция, излучение, кондукция. При этом, 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), – кондукция, т.е. за счет теплопроводности.

При воздействии теплового потока от источника зажигания горючий материал нагревается, затем из него выделяется влага. После испарения влаги материал вновь нагревается до температуры разложения, при этом в атмосферу выделяются летучие продукты, которые смешиваются с воздухом. Если мощность источника зажигания достаточна, то при достижении летучими продуктами  $C_H$ , произойдет воспламенение с возникновением пламенного горения. Если же парогазовоздушная смесь не воспламеняется, то твердое вещество нагревается с выделением продуктов пиролиза. Если по мере развития пиролиза образуется углистый остаток, то скорость термического распада снижается. При определенных условиях может возникнуть гетерогенное горение (тление) углистого остатка, вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и с продуктами разложения. Кроме того, от тлеющего углистого остатка может произойти воспламенение парогазовоздушной смеси, если концентрация ее находится в области воспламенения.

Таким образом, общая продолжительность процесса воспламенения складывается из стадии нагрева влажного материала, сушки, нагрева сухого материала, газификации и стадии нагрева углеродистого остатка при гетерогенном горении.

#### Структура диффузионного пламени над поверхностью ТГМ

Структура диффузионного пламени примерно такая же, как при горении газов и жидкостей (рис. 13). Однако у твердых горючих материалов выше начальная температура, при которой начинается выделение летучих фракций. У древесины, к примеру, она равна 150-200 °С. Максимальная температура диффузионного пламени большинства ТГМ достигает 1200-1250 °С.

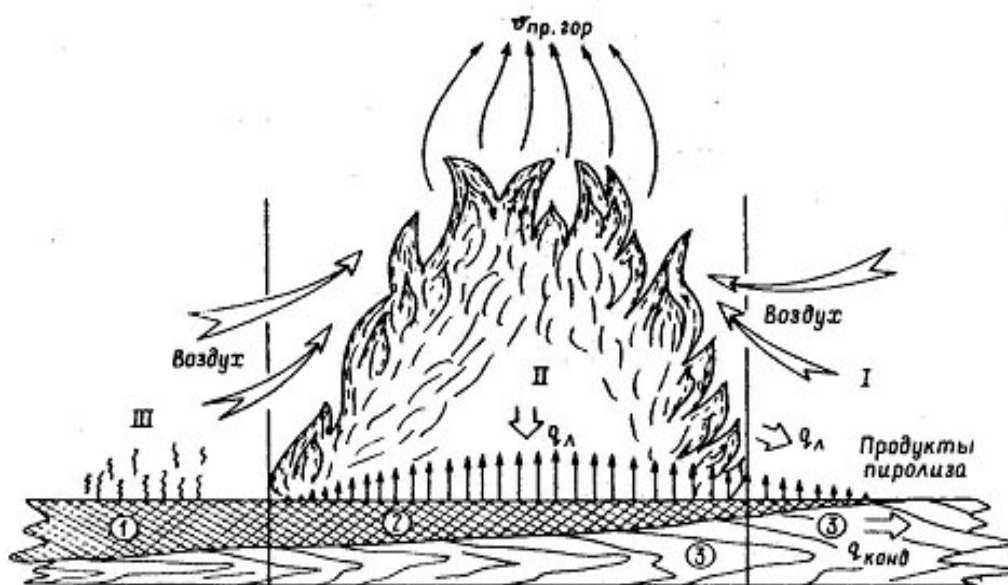


Рис.13. Структура диффузионного пламени над горизонтальной поверхностью твердого горючего материала: I – зона подготовки поверхности ТГМ к воспламенению; II – зона пламенного гомогенного горения; III – зона беспламенного гетерогенного горения (тление); 1 – переугленный остаток; 2 – углистый слой и частично пиролизованная древесина; 3 – "свежая",

Скорость распространения пламени зависит от направления и скорости ветра. Встречный поток воздуха в 2-3 раза может снизить скорость распространения пламени, а попутный, наоборот, увеличить в 2-3 раза. При больших скоростях газовых потоков может произойти останов фронта пламени или его срыв, а при попутном – ускорение или срыв.

На реальных пожарах на скорость распространения пламени по поверхности ТГМ действуют сразу несколько факторов, скорость распространения пламени может увеличиваться под действием каждого из них, возрастая в десятки и сотни раз.

### 3.3. Коэффициент поверхности горения ТГМ

Основным количественным параметром, характеризующим процесс выгорания, является массовая скорость выгорания ( $v_m$ ). Это один из параметров, по которому характеризуют динамику пожара. Скорость выгорания характеризует тепловой режим на пожаре, т.е. величину и скорость изменения температуры пожара. Это определяет допустимое время эвакуации людей, фактическую огнестойкость конструкций и влияет на скорость распространения, а значит, на площадь пожара. Различают массовую и линейную скорость выгорания, однако, в практике пожарно-технических расчетов (расчет сил и средств, необходимых для тушения, расчет продолжительности пожара) используют приведенную массовую скорость выгорания ( $v'_m$ ), под которой понимают количество твердого вещества, выгоревшего в единицу времени с единицы площади пожара. Между собой эти скорости связаны через коэффициент поверхности горения ( $K_{П}$ ):

$$K_{П} = \frac{F_{ПГ}}{F_{П}} ; v_m' = K_{П} \cdot v'_m,$$

где  $F_{ПГ}$  – площадь поверхности горения, м<sup>2</sup>;

$F_{П}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;

$v'_m$  – приведенная массовая скорость выгорания.

Одним из основных параметров, который характеризует пожар, является пожарная нагрузка. Под пожарной нагрузкой понимают массу всех горючих веществ, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> площади пола помещения или площади, занимаемой этими материалами на открытой площадке:

$$P_{ГН} = \frac{P}{F},$$

где  $P_{ГН}$  – пожарная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>;

$P$  – масса горючих материалов, кг;

$F$  – площадь пола помещения или открытой местности, м<sup>2</sup>.

В пожарную нагрузку помещений, зданий и сооружений входят не только оборудование, мебель, продукция, сырье, но и конструктивные элементы зданий, изготовленные из горючих материалов, т.е. стены, пол, потолок, оконные переплеты, двери, стеллажи, перекрытия, перегородки и т.д. Пожарная нагрузка в помещениях делится на постоянную и временную.

Постоянная – горючие материалы строительных конструкций, технологическое оборудование и т.п.

Временная – сырье, готовая продукция, мебель и т.д.

Пожарная нагрузка помещений определяется как сумма временной и постоянной.

Для твердых горючих материалов важное значение имеет структура пожарной нагрузки (ее дисперсность) и характер ее пространственного размещения: плотноуложенными рядами, штабелями, пачками, сплошное расположение или с разрывами, горизонтальное, наклонное или вертикальное. Например, одни и те же картонные коробки, уложенные горизонтально на полу в подвальном помещении и на стеллажах, на высоте в 8 м, дадут совершенно различную картину динамики развития пожара. Во втором случае пожар будет распространяться в 5-10 раз быстрее, чем в первом. Или, например, листовая бумага и обои выгорают практически полностью на ранних стадиях пожара, а в разломах почти не горят. Горение рулонов возможно только после продолжительного прогрева до температуры, значительно большей температуры начала пиролиза бумаги.

Если поверхность твердого материала ориентирована вертикально, в этом случае пламя стелется по поверхности, вовлекая воздушные массы лишь с одной стороны, и обеспечивает конвективный нагрев по мере того, как поток горящих газов обтекает поверхность материала.

Толщина пламени у основания минимальна, с высотой увеличивается. Максимальное значение скорости выгорания достигает на высоте  $\approx 0.2$  м от основания, т.к. от ламинарного режима пламя меняется до турбулентного.

Потолочные облицовочные материалы могут оказаться в зоне пожара и усилить процесс горения под потолком. Но потолочное покрытие редко воспламеняется и горит без существенного подвода тепла от основного очага, расположенного на уровне пола. При реальных пожарах после увеличения площади пожара происходит взаимное облучение от пламени и между различными горящими поверхностями, что приводит к увеличению скорости распространения пожара. Это можно ожидать в любом ограниченном пространстве, где возгораемые поверхности расположены достаточно близко. Поэтому являются более опасными пустоты, ниши, облицованные горючими материалами. Следует обеспечивать адекватную



защиту таких мест. Таким образом, интенсивность горения зависит от относительной площади свободных поверхностей горючего материала. Степень достаточной "открытости" для горения зависит от размеров самой поверхности горючего материала, интенсивности газообмена и др. Например, для спичек достаточно, чтобы зазор был 3 мм, и они будут гореть со всех сторон, а для плит 2000x2000 мм зазор в 10-15 мм недостаточен для свободного горения. На практике свободной считают поверхность, отстоящую от другой на расстоянии 20-50 мм. Учитывает свободную поверхность пожарной нагрузки коэффициент поверхности горения  $K_{II}$ .

Для учета свободной поверхности пожарной нагрузки  $K_{II}$  подсчитывают заранее для любых типов (вариантов) планировок и т.д.

Например, штабеля:  $K_{II}=0.92$  при высоте штабеля 2 м,  $K_{II}=1.84$  при высоте 4 м; стеллажи:  $K_{II}=1.33$  при высоте 2 м,  $K_{II}=2.67$  при высоте 4 м или, например, склады резинотехнических изделий:  $K_{II}=3-6$  (пожарная нагрузка равна 500 кг/м<sup>2</sup>).

Для жилых зданий:  $K_{II}=2\div 3$  (пожарная нагрузка равна 25-50 кг/м<sup>2</sup>). Для большинства видов пожарной нагрузки  $K_{II}$  не превышает значений 2÷3.

При горении жидкостей в резервуарах  $K_{II}=1$ , а для твердых веществ он всегда больше 1. В зависимости от  $K_{II}$  параметры пожара будут различными (бревна, брусья, доски).  $K_{II}$  определяет фактическую величину площади горения, массовую скорость выгорания, интенсивность тепловыделения, температуру пожара, скорость распространения и т.д.

Линейная скорость распространения пожара зависит от толщины материала:

$$v_n = V_p^0 + \frac{B}{\delta},$$

где  $B$  – экспериментальная величина;

$\delta$  – толщина материала;

$v_p^0$  – начальная скорость распространения пламени.

Кроме того, на пожарах, связанных с горением ТГМ, даже равномерно рассредоточенного по площади, вычислить размер площади горения сложно, потому что горение начинается не одновременно по всей поверхности, а только на той ее части, где первоначально возник процесс горения. На следующих участках оно возникает только после того, как на них распространится зона горения, а продолжительность горения этих участков зависит от вида горючего материала, скорости его выгорания и количества. Поэтому процесс горения прекращается не сразу по всей площади пожара, а по участкам, по мере выгорания пожарной нагрузки.

### **3.4. Горение твёрдых неметаллических материалов в состоянии невесомости**

Большую актуальность приобретает вопрос обеспечения пожарной безопасности обитаемых герметичных отсеков изделий космической техники. Для снижения массы в космической технике всё шире и шире применяются неметаллические материалы.

В связи с тем, что в результате регенерации рабочей среды, концентрация кислорода повышается, следовательно, пожарная опасность возрастает.

Жесткие требования к экологии среды в обитаемых отсеках, ограничения по массе и объёму оборудования привели к тому, что большинство средств тушения применять нельзя. Чтобы разработать новые технологии по обеспечению пожарной безопасности, проведены эксперименты по исследованию условий горения в состоянии невесомости на космической станции "Мир" – испытаны органическое стекло, стеклотекстолит и хлопчатобумажный шнур. Эксперименты показали, что при горении органического стекла формируется фронт пламени в форме колокола, охватывающий поверхность стекла, обнаружена уникальная способность этого материала гореть в невесомости при очень малой скорости газового потока – 0.5 см/с, т.к. органическое стекло горит без остатка, который обычно в условиях земли мешает формированию фронта пламени. Кроме того, длительное время сохраняются форма и размер образца, что обеспечивает его высокую температуру прогрева.

### **3.5. Особенности открытых пожаров твердых горючих материалов**

#### ***3.5.1. Пожары на складах лесоматериалов***

Как и все открытые пожары, пожары на складах лесоматериалов характеризуются отсутствием ограничения газообмена. Особенностью этих пожаров в отличие от пожаров газовых фонтанов, резервуаров с жидкостями является большая скорость их распространения, особенно при наличии ветра, а также распространение пожара на значительные расстояния вследствие разлета искр и головней, переносимых мощными конвективными потоками, возникающими в результате образования аэродинамического вихря в зоне горения.

Характерной особенностью пожара на складах лесоматериалов является большой объем зоны горения, что обусловлено большим объемом продуктов термического разложения, которые выделяются с сильно развитой поверхности горючего материала. Стремясь, эти продукты

разложения образуют большое количество нагретых продуктов горения, поднимающихся вверх.

Вследствие этого, формирующиеся мощные тепловые потоки нагретых продуктов горения и воздуха приводят к созданию локальной аэродинамической обстановки, практически независимой от метеоусловий.

Аэродинамические потоки увлекают за собой доски и другие предметы, это способствует возникновению новых очагов пожаров, как правило, на большом расстоянии от основной зоны горения (до нескольких сотен метров). Средняя линейная скорость распространения фронта пламени на складах лесоматериалов изменяется в широких пределах от 0.1 до 4 м/мин, а в некоторых случаях до 10 м/мин и более. Если бревна уложены компактно, то скорость горения их значительно ниже, чем в том штабеле, где возможно проветривание.

Горение штабелей бревен или брусьев, когда материал сложен рядами, можно рассматривать как горение изолированных поверхностей.

В реальных условиях сложная геометрия и конфигурация твердых материалов может существенно влиять на процесс горения. Например, бревна сложены в штабель, который представляет собой сетку поперечно-сложенных рядов бревен. Скопление тепла внутри штабеля и взаимное поперечное тепловое излучение горящих поверхностей способствуют энергичному горению бревен.

Горение по горючему материалу распространяется тогда, когда температура материала достигает температуры воспламенения, т.е. скорость распространения пламени определяется скоростью прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения.

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

Чем больше толщина досок, тем больше тепла расходуется на прогрев досок, т.е. из зоны тепло уходит на прогрев, а так как доски имеют большие линейные размеры, то время прогрева по всей длине увеличивается, а скорость распространения горения уменьшается. В реальных условиях скорость распространения пламени по штабелям из досок толщиной 25 мм в 2-2.5 раза выше, чем по штабелям из досок толщиной 50 мм.

Влажность оказывает большое влияние на скорость распространения пламени, т.к. повышается теплоемкость влажного материала, увеличиваются затраты тепла на нагрев, на испарение влаги. Из-за влажности увеличивается теплопроводность материала, что влечет за собой потери тепла из зоны горения.

Увеличение влажности материала до 28 %, по сравнению с 11 %, приводит к уменьшению скорости горения в 4 раза.

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

$$V_p = V_{po} \left[ 1 + 0,14 \left( \frac{V_{\text{в}}}{V_{po}} \right)^{0,32} \right],$$

где  $V_{po}$  – скорость распространения пламени по штабелям при отсутствии ветра, м/с;

$V_{\text{в}}$  – 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.

Примером таких пожаров может быть пожар в лесопильном цехе г. Петрозаводска в 2004 г. В цехе была древесина, её отходы, масла для смазки оборудования. Здание было большого объёма без перегородок. На крыше велись сварочные работы. Пожар быстро охватил все помещения, достиг ёмкостей с маслом, которые от высокой температуры разгерметизировались. Несущие конструкции обрушились, пожар перешел в открытый. Локализовали через 2 часа, и тушили ещё 4 часа.

### **3.5.2. Лесные пожары**

Лесные пожары являются одной из серьезнейших проблем российских лесов. Реальные масштабы горимости лесов России и размеры наносимого ущерба до настоящего времени не установлены. Регулярные наблюдения за лесными пожарами ведутся только в зоне активной охраны лесов, охватывающей только две трети от общего лесного фонда. В северных районах Сибири и Дальнего Востока активная борьба с огнем практически не ведется, а учет пожаров почти отсутствует.

Официальные источники сообщают, что большинство пожаров происходит по вине человека. Основными местами возникновения пожаров являются стоянки рыбаков, места традиционного отдыха населения, обочины дорог, включая железные дороги, места лесозаготовок, вблизи туристических троп и т.д.

Пространственное распределение лесных пожаров носит случайный характер, а периодичность вспышек, количество пожаров определяется цикличностью атмосферных процессов, длительностью пожароопасных сезонов, повторяемостью засушливых периодов.

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.

Различают низовые и верховые пожары. При низовом пожаре сгорает и выделяет тепло лесная подстилка, состоящая из опавших листьев, хвои, сучьев, веток. При низовых пожарах сгорает живой покров: мох, кустарник, трава. Особенностью этих пожаров является сравнительно небольшая скорость распространения (до 5 км/час) и небольшая высота пламени до 2-2.5 м.

Устойчивый низовой пожар распространяется по нижнему ярусу леса, охватывая нижние части стволов деревьев и выступающие на поверхность корни. Для низового пожара характерна вытянутая форма пожарища с неровной кромкой. Цвет дыма светло-серый, скорость распространения пожара против ветра в 6-10 раз меньше, чем по ветру.

При низкой влажности горючих материалов подстилки и живого покрова, а так же при их большом количестве низовой пожар может видоизменяться в верховой, когда распространение пламени происходит по кронам деревьев. Это наиболее губительный пожар для лесных массивов.

При верховом беглом пожаре, возникающем только при сильном ветре, огонь распространяется по кронам скачками, опережая фронт низового пожара. Ветер разносит горящие ветви, искры, мелкие

раскаленные объекты, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров впереди основного очага. В результате возникают так называемые пятнистые пожары, самые страшные из всех видов пожаров. Пятна новых возгораний быстро соединяются друг с другом, образуя обширную горящую площадь.

При благоприятных погодных условиях скорость верхового пожара может достигать 25 км/час, а в Иркутской области, например, большая часть лесных массивов находится на расстоянии 50÷250 км от районных центров.

В ряде случаев огонь перебрасывается через реки, широкие дороги, безлесые участки и другие кажущиеся рубежи.

Верховые пожары выделяют большое количество тепла, при этом образуются мощные потоки продуктов горения и нагретого воздуха, создается мощная конвекционная колонка (высотой до 5 км), за счет которой на высоту свыше 1 км поднимаются горящие угли. Выпадая 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.

Форма площади при беглом верховом пожаре выгнутая по направлению ветра. Дым верхового пожара темный.

При распространении беспламенного пожара в слое подстилки возникает почвенный пожар. Почвенные пожары делятся на подстилочные, дерновые, торфяные.

По статистике большее число пожаров приходится на долю низовых. Среди них различают слабые, с высотой пламени до 0,5 метров; средние, с высотой пламени от 0,5 до 1,5 метров; сильные, с высотой пламени от 1,5 метров. По характеру распространения низовые пожары делят на беглые и устойчивые. При беглых пожарах сгорает лишь верхняя часть напочвенного покрова, а при устойчивых покров нередко прогорает до почвы. Горение в этих случаях сопровождается тлением и длится дольше.

Поведение пожара в лесу зависит и от характера самого леса. В сухих сосновых лесах с покровом из лишайника огонь распространяется быстро и сплошным фронтом. В разреженных лесах низовой пожар проявляется сильнее, а верховой слабее. Скорость распространения увеличивается при движении вверх по склону.

Чем длиннее фронтальная кромка и чем сильнее горение на ней, тем труднее задержать огонь какой-либо преградой. Под пологом леса фронтальная кромка слабого низового пожара задерживается преградой 2-3 метра, а в случае пожара средней силы—5-6 метров. В случае сильного пожара ширина преграды не должна быть меньше 10 метров.

### 3.5.2.1. Лесные пожары в Иркутской области

Одной из главных задач любого муниципального образования является обеспечение безопасности на его территории. Не исключением является и Иркутская область, в которой сосредоточены потенциально опасные объекты экономики. Кроме того, разнообразные рельефные, климатические, гидрографические, гидрологические условия, сложные геологические и геофизические процессы региона, обуславливают высокую вероятность возникновения на территории области различных ЧС природного характера, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности воздействия на население и окружающую среду могут нанести существенный социальный и экономический ущерб. Наибольшую опасность представляют лесные пожары.

Результаты многолетних исследований обобщены и в настоящей работе рассмотрены пожарные риски лесных пожаров для населения Байкальского региона.

Леса Российской Федерации занимают около 1/5 лесных земель мира. Это природное богатство является важнейшим фактором для обеспечения устойчивого развития не только России, но и всего человечества. Ни для кого не секрет, что наше лесное богатство обеспечивает необходимый баланс кислорода на планете. Справедлива фраза о том, что «планета дышит легкими России». На долю России приходится 22 % покрытой лесом площади земного шара, около четверти мировых запасов древесины, в том числе 50 % - хвойных пород. Это почти в 3 раза больше, чем в США; в 2 раза больше, чем в Канаде. Запасы спелой и перестойной древесины в российских лесах оцениваются в 48 млрд м<sup>3</sup>. Лесами покрыто около 50 % российской территории, но распределены они неравномерно. Значительные лесные массивы находятся в малообжитых северных и восточных районах, вдали от промышленных центров и рынков сбыта. В европейской части страны, где проживает более 80 % населения и сосредоточены основные потребители лесопродукции, имеется всего четверть лесных ресурсов; три четверти расположено в Азиатской России, преимущественно в Восточной Сибири. Территория Иркутской области имеет самую высокую лесистость (78%) среди субъектов Российской Федерации. На одного жителя в Иркутской области приходится 21,6 га покрытой лесом площади, что почти в 5 раз больше, чем в среднем по Российской Федерации, и в 84 раза больше, чем в Западной Европе. Этот показатель говорит о значительном лесосырьевом потенциале территории.

В лесах преобладают хвойные породы деревьев, среди которых наиболее распространенной и ценной в хозяйственном отношении является *сосна*. В пределах Иркутской области это основной объект

лесозаготовок. Наиболее крупные сосновые леса произрастают в бассейнах Ангары, Илима, Лены и других рек южной части Среднесибирского плоскогорья, преимущественно на песчаных почвах. Второе место по хозяйственной значимости в Иркутской области занимает *лиственница*. Ее древесина отличается высокой стойкостью к загниванию и ценится как высококачественный строительный материал. Постройки из лиственницы могут служить несколько столетий. Лиственничные леса доминируют в северных районах Иркутской области. В бассейне Нижней Тунгуски преобладает лиственница сибирская, здесь же встречается и лиственница даурская, а в Катангском районе лучшей древесиной образует лиственница Чекановского разновидность даурской. На богатых почвах водораздельных равнин древесиной становятся смешанными, с лиственницей соседствуют кедр и ель, а в западной части области — пихта. Древесина *кедра* обладает исключительно высокими техническими качествами (прочностью, мягкостью, легкостью, стойкостью к загниванию). Но ее заготовка ограничена, поскольку часть кедровых лесов выделена в орехово-промысловые и охотничье-промысловые угодья, а установленный возраст рубки кедровых лесов намного выше возраста других хвойных пород. Кедровые леса характерны для района Восточного Саяна, верховьев Лены, северо-западных склонов прибайкальских гор. В предгорных зонах кедр растет вместе с елью и лиственницей, реже с сосной, а на высоте свыше 900-1000 м находятся чистые кедровники. Произрастая в горах, кедровые леса имеют важнейшее природоохранное, почвозащитное и водорегулирующее значение.

Среднегодовой прирост древесины в Иркутской области оценивается в 50-70 млн м<sup>3</sup>, а ее общие запасы в 7-9 млрд. м<sup>3</sup> (11 % общероссийских запасов), что превышает ресурсы таких стран, как Швеция, Норвегия, Финляндия, Югославия и Франция вместе взятых. Запасы древесины на 1 га лесопокрытой площади составляют примерно 120-150 м<sup>3</sup> (по России - 110 м<sup>3</sup>), из которых 95 % приходится на хвойные породы. Весьма благоприятны и таксационные показатели. Например, объем хлыста в лесах южных и центральных районов Иркутской области превышает 0,5 м<sup>3</sup>, в то время как на Урале он равен 0,3-0,4 м<sup>3</sup>, а на северо-западе Европейской России — 0,2-0,3 м<sup>3</sup>.

Леса Иркутской области характеризуются высокой горимостью. Горимость лесов — величина, определяемая количеством и площадью лесных пожаров. Лесные пожары представляют собой стихийное (неуправляемое) распространение огня в лесу (на покрытых и не покрытых площадях, землях лесного фонда).

Со временем пожарная опасность в лесах возрастает. Это вызвано увеличением площади молодняков, лесных культур, вырубок и других



лесных участков. Особенностью лесного фонда является преобладание пожароопасных хвойных насаждений (более 90%) от всей площади покрытой лесом. Продолжительность пожароопасного периода максимально может, составляет около 170 дней.

На территории области есть районы, в которых традиционно высокая горимость лесов, к ним относятся: Братский, Иркутский, Жигаловский, Качугский, Куйтунский, Тайшетский, Тулунский, Ольхонский, Усть-Илимский и Усольский (рис. 14). В указанных районах не исключается возможность возникновения угрозы населённым пунктам, как непосредственно пожаром, так и высокой задымленностью.

Лесопожароопасный период на территории области начинается во второй половине апреля - начале мая. Первые пожары, как правило, возникают в южных территориях, и приурочены к границе области или переходят из сопредельных территорий. Весной пожары приобретают массовый характер, и регистрируются, в южных, а в июне в северных территориях области. Высокая опасность лесных пожаров по области сохраняется до начала октября.



Рис. 14. Административная карта Иркутской области.

Основной причиной лесных пожаров на больших площадях могут послужить природно-климатические условия (высокая степень пожарной опасности погодных условий в районах с высокой горимостью лесов), неосторожное обращение с огнем местного населения при сборе ягод и грибов. Это является причиной 70—90 % лесных пожаров. Кроме того, несвоевременное обнаружение и тушение возникающих очагов пожаров приводит к большому ущербу.

Динамика развития лесных пожаров в Иркутской области за 7 лет представлена на рис. 15.

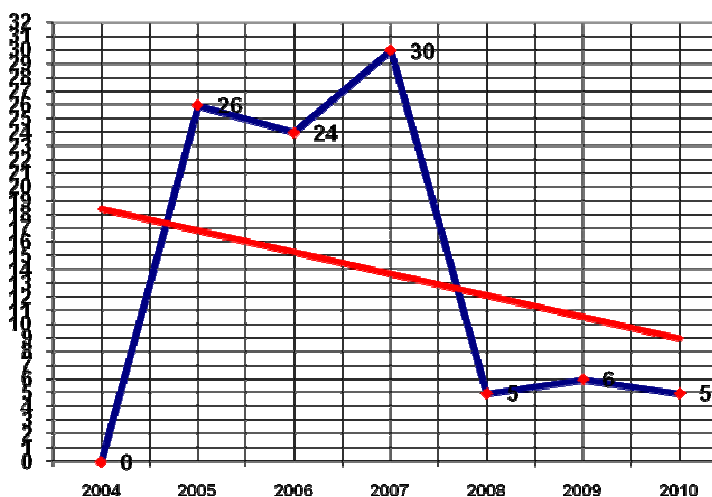


Рис 15. График массовых лесных пожаров Иркутской области в период за 2004-2010 гг.

Для населения области лесные пожары представляют реальную угрозу. Особенно опасны ландшафтные пожары.

**Ландшафтный пожар** — пожар, охватывающий различные компоненты географического ландшафта.

Данные по населенным пунктам и объектам Иркутской области, находящихся в лесной зоне, на которых имеется угроза распространения возможного ландшафтного пожара представлены в таблице 3.1.

**Таблица 3.1. Районы Иркутской области, находящиеся в лесной зоне с риском возможного распространения пожара (данные \*)**

Наименование района	Количество жилых домов частного сектора	Количество человек, подпадающих под риски
Балаганский район	383	1200
Братского района	1304	3282
Жигаловский район	1905	5878
Зиминского района	1421	4731
Иркутский р-он	323	344
Катангский р-он	191	769
Киренского района	746	1480
Куйтунский район	3177	9545
Слюдянского района	235	689
Тулунского района	1810	5008
Тайшетского района	1847	5555
Усольского района	1897	5500
Усть-Кутский	1210	3950
Черемховский	3768	
Шелеховский	4445	861

\*Материалы в Госдоклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», МЧС РФ по Иркутской области, 2010 г.

Из данных табл. 3.1 следует, что в зону возможного риска подпадает 25097 жилых домов частного сектора, с населением 69 911 человек, что составляет примерно 2,8 % от населения Иркутской области.

На территории каждого муниципального образования органами местного самоуправления осуществляется муниципальный лесной контроль в соответствии со статьей 84 Лесного Кодекса и с Федеральным законом от 26 декабря 2008 года N 294-ФЗ "О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля" (Статья в редакции, введенной в действие с 1 августа 2011 года Федеральным законом от 18 июля 2011 года N 242-ФЗ).

Охрана лесов от пожара осуществляется как наземными службами, так и авиационной охраной лесов.

Авиационная охрана лесов - охрана лесов от пожаров, действующая на основе использования авиационных сил и средств. Для авиационной охраны лесов создана служба ФГУ «Авиалесоохрана. В Иркутской области авиаохраной лесов от пожара занимается ОГУ «Иркутская авиабаза».

Авиационная охрана лесов имеет огромное значение в обнаружении и тушении лесных пожаров. Авиацией обнаруживается до 70 % всех пожаров, возникающих на всей обслуживаемой ею территории лесного фонда и до 95 % пожаров в районах преимущественного применения авиационных сил и средств пожаротушения. С применением авиации ликвидируется около 45 % пожаров, возникающих на всей обслуживаемой авиацией территории, и до 95 % пожаров в районах преимущественного применения авиационных сил и средств пожаротушения.

Авиабазы, в том числе и Иркутская авиабаза, выполняют работы по договорам с территориальными органами федерального органа управления лесным хозяйством, другими ведомствами и несут перед ними ответственность за надлежащее выполнение принятых договорных обязательств. Основные положения договора устанавливает Федеральная служба лесного хозяйства России. Территории лесного фонда, отнесенные к зоне авиационной охраны, подразделяются на районы, в которых тушение пожаров должно производиться авиационными силами и средствами (район авиационной охраны) (АСС), и районы, в которых тушение пожаров должно производиться наземными силами и средствами (район наземной охраны).

К районам авиационной охраны относятся территории, на которых своевременное обнаружение и ликвидация лесных пожаров не могут быть обеспечены имеющимися наземными силами и средствами пожаротушения. В районах наземной охраны авиабазы могут обеспечивать

обнаружение лесных пожаров, оповещение наземной лесной охраны о их возникновении, распространении и необходимых мерах по борьбе с огнем.

Авиабазы выполняют следующие виды работ:

- авиационное патрулирование лесного фонда и не входящих в лесной фонд лесов и других природных ландшафтов с целью обнаружения лесных и других пожаров;
- тушение лесных пожаров силами и средствами средствами парашютной и десантно-пожарной (ПДПС) службы и с воздушных судов в районах авиационной охраны лесов, оленьих пастбищ и охотничьих угодий, а также оказание содействия органам управления лесным хозяйством и лесопользователям в обнаружении и тушении лесных пожаров;
- доставку воздушными судами к местам лесных пожаров для их тушения и обратно людских ресурсов, технических и других средств борьбы с лесными пожарами;
- организацию разработки и внедрения технических, других средств и технологий обнаружения и тушения лесных пожаров с применением авиации;
- проведение противопожарной пропаганды и других профилактических мероприятий авиационными и обычными методами и средствами;
- выполнение других авиационных и иных работ по обслуживанию органов управления лесным хозяйством;
- участие в обеспечении мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными и тундровыми пожарами, и проведение первоочередных авиационно-спасательных работ.

Иркутская авиабаза осуществляет авиационную охрану лесов на площади 71 млн гектаров, в том числе леса МПР России 69 млн га, из них 1,6 млн га — это Прибайкальский национальный парк, Байкало-Ленский и Витимский заповедники. Леса Минсельхоза России составляют 1,1 млн гектаров и Минобороны России — 0,4 млн гектаров, что составляет 72 % охраняемой территории по своей доступности. Анализ наземной охраны

Анализ официальных данных о лесных пожарах в Иркутской области за период 1947-2010 гг. также показывает хорошо выраженную 3-4-летнюю цикличность пожарной активности даже без специальной статистической обработки (рис.16). На графике, представленном на рис. 17, обращает на себя внимание снижение как числа пожаров, так и более значительное уменьшение пройденной пожарами площади в конце 1990-х гг. На эти годы пришелся максимум 60-летнего цикла весенне-летнего атмосферного увлажнения. Но уже в 2003 г. в самом начале нисходящей ветви цикла, число пожаров увеличилась, хотя адекватного увеличения сгоревшей площади не произошло.

Динамика горимости лесов за последние 10 лет приведена в табл. 3.2. Из нее видно, что в 60% случаев средняя площадь пожара превышала значение в 25 га, являющееся критерием для определения ЧС муниципального уровня.

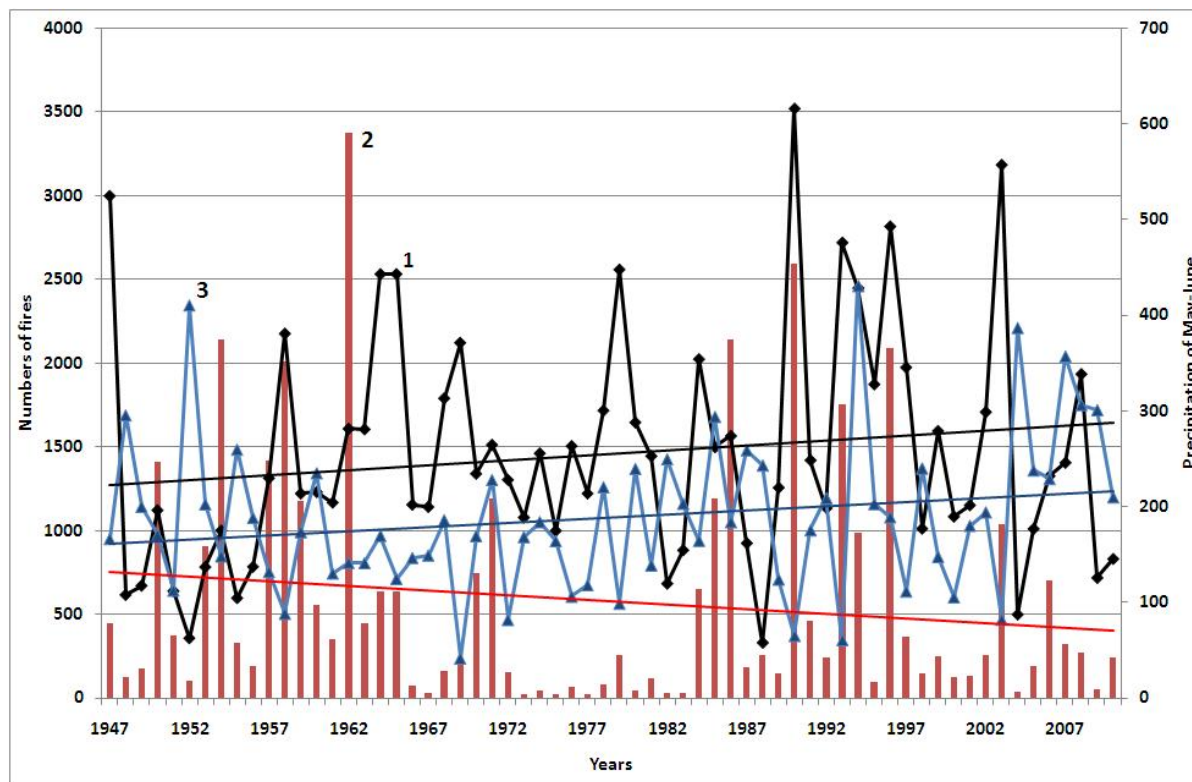


Рис. 17. Количество пожаров в 1947-2009 гг. (1), площадь, охваченная пожарами (2) и количество атмосферных осадков в мае-июне (3) в Иркутской области. Линейные тренды показаны соответствующим цветом (данные: Воронин В.И., Шубкин Р.Г. Анализ многовековой хронологии лесных пожаров и прогноз их возникновения в Байкальском регионе /Пожарная безопасность, 2007).

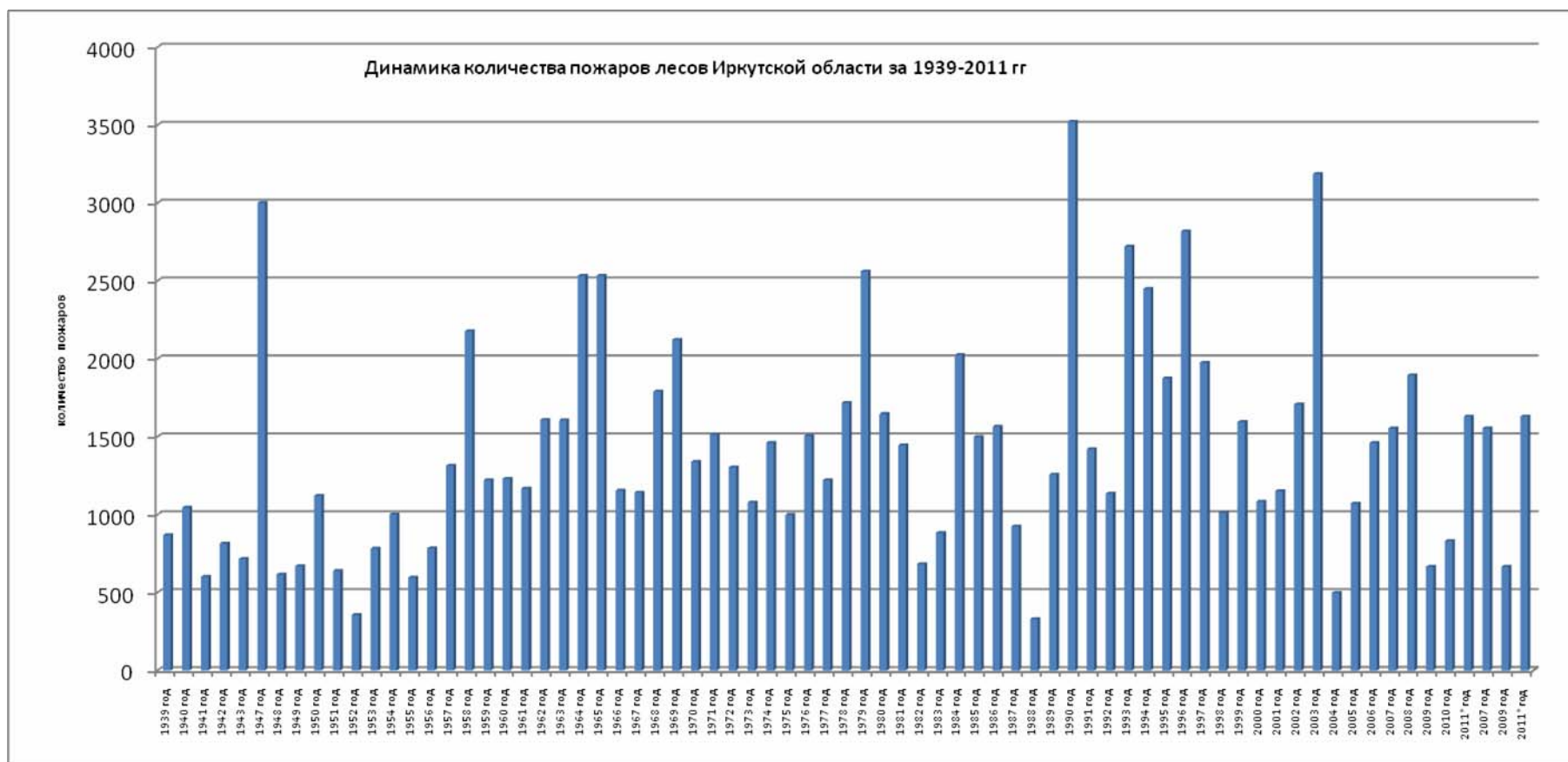


Рис. 16. Динамика количества лесных пожаров Иркутской области за 1939-2011 гг.

Таблица 3.2. Динамика горимости лесов, находящихся в ведении агентства лесного хозяйства Иркутской области с 2000 по 2010 гг.\*

Годы	Кол-во пожаров (случ.)	Выгоревшая лесная площадь (га)	Средняя площадь одного пожара (га)	Число пожаров на 1 млн.га охраняемой территории (случ.)	Площадь пройденная пожарами на 1 млн. га охраняемой территории (га)	Ущерб млн.руб
2001	1151	23270	20,2	17,3	349,9	
2002	1708	45124	26,4	25,6	677,5	716,2
2003	3186	181395	56,9	47,8	2722,8	1243,4
2004	498	6864	13,8	7,5	102,9	1,2
2005	945	32097	34	13,8	470,6	
2006	1460	119016	81,5	21,0	1715	
2007	1554	46702	30,1	22,4	672,9	367,0
2008	1893	43787	23,1	27,2	630,9	188,4
2009	665	8050	10,8	9,6	115,9	155,2
2010	830	42366	51	12,0	610,5	321,6
Средние показатели за 2001-2010 гг.						
	1389,0	54864,1	39,5	18,1	777,5	427,5

\* Материалы в Госдоклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», МЧС РФ по Иркутской области, 2010 г.

Существующие методики оценки лесопожарной обстановки позволяют определить площадь и периметр зоны возможных пожаров в регионе (области, районе). Исходными данными являются значение лесопожарного коэффициента (класса пожарной опасности – КПО) и время развития пожара.

Значение КПО зависит от природных и погодных условий региона и времени года и определяется по показателю Нестеровича, учитывающем температуру воздуха и увлажнение территории. В 2010 г. средний КПО составил II,0, а средне пятилетний показатель – II,4 (чрезвычайный КПО – V). В Иркутской области высшие классы пожарной опасности присущи мая-июню. Соответственно, только располагая информацией о многолетней динамике атмосферных осадков этих месяцев, в сопоставлении с данными о лесных пожарах можно создать вероятностный прогноз возникновения ЧС. Согласно проведенным исследованиям хронологии лесных пожаров за несколько последних веков была выявлена цикличность возникновения крупномасштабных пожаров, равная 60 годам (см. выше рис. 17). На отрезке времени, для которого имелись инструментальные климатические данные, хронология пожаров была сопоставлена с метеоданными и была выявлена тесная связь возникновения крупномасштабных пожаров с осадками мая-июня. Предложена сводная диаграмма пожарных хронологий всех обследованных районов на фоне изменения суммы осадков мая-июня, в которой прослеживается 60-летняя цикличность (рис. 17).

На основании этих материалов можно предположить, что в соответствии с циклическим ходом снижения осадков в мае-июне, наиболее

сложная лесопожарная обстановка в Байкальском регионе установится в 2012-2015 гг., когда будет достигнут внутривековой минимум 60-летнего цикла атмосферного увлажнения в весенне-летний период.

### ***3.5.3. Торфяные пожары***

Подземные пожары возникают на хорошо просохших участках с торфяными почвами. Пожар по слою торфа распространяется медленно, до нескольких метров в сутки. Торф может сгорать на всю глубину сухого слоя или до минеральной земляной подстилки.

Торф – это горючее полезное ископаемое, используется как топливо, удобрение, теплоизоляционный материал и др. Торф образуется из скопления остатков растений, подвергшихся неполному разложению в условиях болот, содержит 50-60% углерода. Печальную известность торф приобрел в связи с подземными пожарами, известными человечеству на протяжении тысячелетий. Такие пожары практически не поддаются тушению и представляют огромную опасность.

Торфяные пожары чаще всего бывают в местах добычи торфа, возникают обычно из-за неправильного обращения с огнем, от разрядов молнии или в результате самовозгорания. Торф склонен к самовозгоранию, так как поверхность почвы в летний период может прогреваться до 52-54 градусов. Часто почвенные торфяные пожары являются следствием низового лесного пожара. Огонь в этом случае заглубляется у стволов деревьев. Горение происходит медленно, беспламенно. Торф может гореть во всех направлениях независимо от направления и силы ветра, а под слоем почвы он может гореть во время дождя и снега.

При длительном сохранении жаркой погоды создаются условия для развития пожаров. Осушенные залежи торфа способны гореть даже весной. На скорость пожара оказывает влияние скорость ветра. Так, при скорости ветра 10 м/с и больше горящая торфяная 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 торфяных полях чаще всего бывает угловой с расширением ее по направлению ветра. Переносимая ветром горящая крошка представляет опасность для людей. Торфяная масса содержит в своих порах достаточное количество воздуха, поэтому способна гореть по гетерогенному механизму (тлеть) даже без доступа воздуха, образуя подземные пожары, которые при тушении представляют серьезную опасность для людей и техники. Скорость распространения подземного пожара невелика и достигает нескольких метров в сутки. Выгоревшие места опасны, так как в них проваливаются участки дорог, техника, люди, дома.

Примеры пожаров:

1) Пожар под Ржевом, огонь охватил площадь торфяников на площади около 1000 м<sup>2</sup>. Едкий дым накрыл полностью населённый пункт.



2) Осень 2005 года – лесоторфяные пожары в Подмосковье. Не видно ничего на расстоянии вытянутой руки, даже фары не помогали. Причина – пересушенная почва, а люди выезжали на природу. Сначала площадь возгорания составляла 20 га. Пожар тушили и техникой, и подручными средствами (сбивали пламя вениками, засыпали песком, лили воду из вёдер).

При торфяных пожарах очаги возникают в разных местах, огонь распространяется на огромные территории и уходит в подземные слои, где горение может не прекращаться годами. Локализация и ликвидация очагов торфяных пожаров является трудоемкой работой, требующей больших материальных, физических и человеческих ресурсов. Тушение торфяных пожаров почти всегда происходит в условиях дефицита воды. Орошение горящего торфа не дает вообще никаких результатов, так как торф не смачивается водой и она просто стекает по поверхностному слою. Сейчас некоторые гарнизоны используют для тушения торфяной ствол «Гидробур». Вода поступает из наконечника ствола, размывает грунт и потом вода поступает в ту точку, которая является очагом.

Меры борьбы с торфяными пожарами:

Опахивание населённых пунктов, устанавливаются противопожарные барьеры, обводняются торфяные залежи (для этого перекрывают устья обводных каналов), строятся водоёмы, проводится работа с населением.

#### ***3.5.4. Степные пожары***

Степные пожары возникают на открытой местности с сухой растительностью.

Эти пожары наиболее опасны в сухую погоду. Скорость распространения пожара достигает 700 м/мин. Такая высокая скорость обусловлена характеристикой горючего материала. Трава, злаки, по которым распространяется пожар, имеют очень незначительные размеры сечения. Стебли представляют тонкостенные высохшие трубки полые внутри, которые легко воспламеняются под воздействием фронта пламени. Наличие ветра способствует увеличению скорости распространения пламени вследствие наклона факела к еще негорящим материалам, а также из-за переноса искр воздушными потоками.

Другой особенностью таких пожаров является сравнительно небольшая ширина фронта, что обуславливается 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) шириной до 12 м.

Степные пожары могут переходить в лесные, торфяные и вызывать пожары населённых пунктов, предприятий. От степных пожаров по механизму выгорания не отличаются пожары буртов хлопка, стогов сена, соломы. В случае их загорания пламя быстро распространяется по

поверхности, а затем может переходить в процесс относительно медленного выгорания. Выгорание резко интенсифицируется при наличии ветра, когда скорость подвода воздуха к тлеющим поверхностям горючего усиливается.

В этом случае возможен перенос горящих частиц и увеличение площади пожара.

## Глава 4

### ПОНЯТИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННЕГО ПОЖАРА

Развитие пожара и характер его воздействия на различные объекты является сложным физическим процессом. Перенос тепла от очага горения к ограждающим конструкциям в основном происходит за счет конвективных потоков продуктов сгорания, излучения, теплопроводности и непосредственного воздействия пламени на конструкции. Механизм теплового взаимодействия между очагом и конструкциями зависит от взаимного расположения и геометрических размеров факела и самих конструкций. Характеристики горючей нагрузки, свойства продуктов сгорания, теплотехнические характеристики конструкций, а также характер газообмена влияют на величину теплового взаимодействия очага с конструкциями.

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.

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 пожара, и параметры пожара с учетом их изменения во времени, определить время достижения, например, разрушения остекления, перехода пожара в стадию полностью развившегося, а также время, в течении которого помещение заполнится дымом.

Под динамикой пожара понимается изменение основных параметров пожара во времени и в пространстве.

#### 4.1. Основные периоды и фазы развития внутреннего пожара

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 °С, высота помещения ( Н ) больше 3 м, но меньше 6 м; площадь помещения 20÷30 м<sup>2</sup>, а соотношение площади проемов к площади пола примерно равно  $\frac{F_{np}}{F_n} \approx \frac{1}{10}$ . Очевидно, что 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 (заклучительный) – 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 (НСП).

Зависимость температуры пожара от времени горения показана на рис. 18.

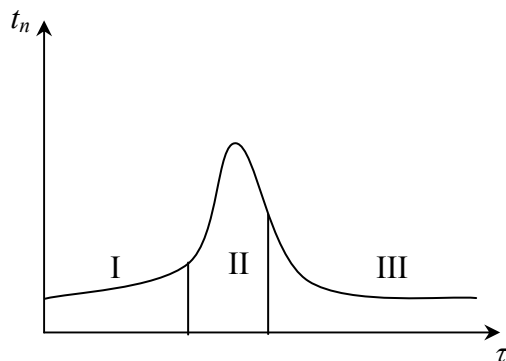


Рис.18. Зависимость температуры пожара от времени

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 НСП.

При анализе динамики развития внутреннего пожара выделяют следующие фазы:

#### I фаза

Пожар начинается с возникновения открытого пламенного горения или тления на сравнительно небольшом участке. Пламя начинает медленно распространяться по поверхности горючего материала. Вокруг зоны горения сразу возникает конвективный газовый поток, который обеспечивает необходимый газообмен. Поверхность горючего материала под зоной горения и перед ней начинает прогреваться на большую глубину. В результате увеличивается интенсивность выделения газообразных продуктов разложения. Размер факела пламени увеличивается и продолжает распространяться по поверхности на те зоны, где поверхностный слой прогрелся до температуры, равной и выше температуры воспламенения. Одновременно интенсифицируется лучистый поток тепла в окружающее пространство, в том числе и к поверхности горючего материала. Эта первая фаза пожара – переход загорания в пожар, длится 1-3 минуты.

#### II фаза

Начинается вторая фаза развития пожара. В действие вступает следующий фактор – медленное повышение температуры среды в помещении. Все описанное выше повторяется, но с большей

интенсивностью, быстрее прогревается вглубь "горящий" слой горючего материала, значит, интенсивно выделяются продукты разложения, быстрее растёт объем зоны горения, интенсивней становится конвективный, тепловой, газовый и лучистый потоки, увеличивается площадь пожара, в том числе и за счет скорости распространения горения. Эта фаза длится 5-10 минут.

### III фаза

Бурный процесс нарастания всех параметров пожара, температура поднимается до 250-300 °С. Начинается стадия *объемного развития пожара*, пламя заполняет практически весь объем помещения, а процесс распространения горения происходит уже не по поверхности, а дистанционно через разрывы пожарной нагрузки. Под действием конвективных и лучистых потоков воспламеняются отдельно стоящие предметы и горючие материалы. Это объемная фаза развития пожара. При температуре газовой среды около 300 °С происходит разрушение остекления. Догорание продуктов неполного сгорания может происходить за пределами помещения. Огонь вырывается из проемов наружу. При нагревании стекол окон до 300 °С и выше они начинают разрушаться и выпадать в сторону действия источника нагрева. Так, при горении внутри, они будут падать внутрь помещения, это может быть ошибочно воспринято как признак разбивания стекла от удара снаружи. Надо иметь в виду то, что так как высокая температура развивается в верхнем приточном слое дыма, то и остекление разрушается с верхнего уровня. Установить было ли остекление до начала горения, позволяет слой копоти на поверхности стекла со стороны очага пожара.

### IV фаза

Скачком изменяется интенсивность газообмена, она резко возрастает, т.к. интенсифицируется приток воздуха и отвод продуктов горения. Это уже четвертая фаза пожара. В этой фазе первоначально температура в помещении может кратковременно снизиться, но в результате изменения условий газообмена резко возрастают такие параметры, как скорость выгорания, скорость распространения горения, а значит, резко возрастают удельное и общее тепловыделения на пожаре. Температура, несколько снизившаяся в момент притока воздуха, резко возрастает, достигая 500-600 °С. Процесс развития пожара бурно интенсифицируется, увеличиваются все параметры: интенсивность выгорания пожарной нагрузки, степень задымления достигает максимума.

### V фаза

Пятая фаза пожара – стабилизация. Обычно наступает на 20-25 минуте и длится в зависимости от величины пожарной нагрузки еще 20-30 минут.

### VI фаза

Наступает шестая фаза пожара. Она характеризуется постепенным снижением его интенсивности, т.к. основная часть пожарной нагрузки выгорела. На поверхности горючего материала толщина обугленного слоя

составляет 5-10 мм и препятствует проникновению тепла вглубь и выходу летучих продуктов в газовую фазу. Верхний слой угля начинает беспламенно гореть, поглощая значительную часть кислорода воздуха, в помещении скапливается большое количество продуктов горения. Среднеобъемная концентрация кислорода снижается до 16-17 %.

Температура в зоне горения снижается, интенсивность теплового потока снижается, интенсивность горения медленно снижается, что влечет за собой снижение всех параметров пожара, кроме площади пожара. Площадь пожара не сокращается, она может расти или стабилизироваться, а площадь горения сокращается.

#### VII Фаза

Происходит догорание в виде медленного тления. После этого через некоторое время, которое может быть весьма продолжительным, пожар догорает и прекращается.

### **4.2. Основные параметры развития внутреннего пожара**

О характере 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.

Обычно выделяют первичные, определяющие параметры и вторичные, т.е. производные от них. Но сделать это очень трудно, т.к. сложно определить, что при каждом конкретном пожаре является первичным, что вторичным – тепловыделение определяет газообмен или газообмен влияет на тепловыделение? Кроме того, параметры пожара делят на первичные и вторичные в зависимости от цели исследования, и не всегда первичные параметры являются определяющими.

Поэтому, пришли к мнению, что в качестве основных параметров, изменяющихся во времени, для изучения динамики применяют линейную скорость распространения пламени, площадь пожара, температуру пожара и интенсивность газообмена. Они наиболее доступны измерению, анализу и расчету, служат исходными параметрами для определения вида применяемой техники, расчета сил и средств, проектирования автоматической системы пожаротушения и т.

Для описания пожара в качестве основного параметра традиционно используется линейная скорость распространения фронта пламени  $v_f$  (м/с). В однородных газо-, паро-, пылевоздушных смесях скорость распространения фронта пламени составляет 0,2–0,5 м/с. Близкие к этим значениям скорости наблюдаются при распространении фронта пламени вдоль поверхности горючих жидкостей в зависимости от ее температуры.

Иногда для расчета скорости распространения пламени используют формулу:

$$v_{л} = \frac{1}{2} v_{л}^{табл}.$$

Величина линейной скорости не является неизменной и зависит от свойств горючего материала (его дисперсности, влагосодержания, пространственной ориентации, а также от внешних условий среды: температуры, концентрации окислителя, скорости движения среды, плотности теплового потока), а также зависит от средней температуры пожара и интенсивности газообмена:

$$v_{л} = (a_1 T_{п} + \epsilon_1 J_{г}) v_{ло}^{табл},$$

где  $a_1$  и  $\epsilon_1$  – коэффициенты, устанавливающие зависимость  $v_{л}$  от средней температуры пожара и интенсивности газообмена;

$v_{ло}^{табл}$  – линейная скорость распространения горения для данного вида горючего, м/мин;

$T_{п}$  – средняя температура пожара, К;

$J_{г}$  – интенсивность газообмена, кг/м<sup>2</sup>·с.

В начальные 10 минут развития пожара рекомендуется принимать значения линейной скорости, составляющей 50% от справочной. В справочной литературе, как правило, приводят значения, относительно постоянные, наибольшие и характерные для развившейся стадии пожара, поэтому при рассмотрении динамики развития внутреннего пожара следует проявлять осторожность. Неосторожность может проявиться в использовании справочных данных о скорости распространения пламени в различных объектах. Они справедливы для условий развившегося пожара, но некорректны для начальной стадии. Это может повлечь ошибочное заключение. В справочных данных практически отсутствует связь с особенностями развития конкретного пожара. Для большинства пожаров процесс увеличения линейной скорости продолжается не 10 мин, а больше, в некоторых случаях меньше 10 мин.

Для начальной стадии пожара предлагается использовать для расчета линейной скорости пожара следующую формулу:

$$v_{л}(\tau) = a + b \cdot \tau,$$

где  $\tau$  – время от начала горения, сек;

$a, b$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и его массы, т.е. толщины слоя:

для древесины при влажности 16-20% и плотности 36-60 кг/м<sup>3</sup>,

$$a = 0,56; b = 0,0014,$$

для оргстекла

$$a = 0,78; b = 0,0028.$$

В зависимости от угла наклона пламени к поверхности, вдоль которой распространяется пламя, скорость распространения пламени может



увеличиваться, если угол наклона положительный (т.е. горение распространяется снизу вверх). Увеличению скорости в этом случае способствует интенсификация прогрева поверхности материала за счет лучистой и конвективной теплопередачи. По экспериментальным данным при наклоне в  $26^\circ$  скорость возрастает в 5 раз.

И, наоборот, если угол отрицательный, т.е. наблюдается нисходящее распространение пламени, скорость уменьшается в  $2 \div 2,5$  раза. Но, к сожалению, надежных формул для определения скорости распространения пламени в зависимости от ориентации, толщины, ширины и др. свойств материала в литературе нет. В реальных условиях для определения скорости предпочтительно ставить модельный эксперимент.

Моделирование представляет собой исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей. В экспертном эксперименте воссоздаются условия, имевшие место в действительности на момент возникновения пожара. При этом предполагается, что модель и оригинал имеют одинаковые свойства, а процессы, в которых они проявляются идентичны. В таких случаях обычно не требуется масштабных преобразований

Зависимость площади пожара от основных его параметров имеет вид:

$$F_n = k(v_n \cdot \tau)^n,$$

где  $k$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от геометрической формы площади пожара;

$v_n$ ,  $\tau$  – скорость распространения пожара и время его свободного развития.

Если пожар имеет круговую форму, тогда  $k = \pi$ ,  $n = 2$ . Если пожар возник у несгораемой вертикальной стенки или у края расположения пожарной нагрузки (форма площади пожара – полукруг), тогда  $k = \frac{\pi}{2}$ ,  $n = 2$ .

Расстояние, пройденное фронтом пламени за время его свободного развития, равно:

$$l_\tau = v_p \cdot \tau.$$

При внутреннем пожаре продолжительность начальной стадии пожара, соответствующая переходу в стадию полностью развившегося пожара, может быть определена из выражений:

– для помещений, объемом меньше  $3000 \text{ м}^3$

$$\tau_{НСП} = 0,0094 \cdot \tau_m \cdot [v'_m \cdot Q_{H_m}^P \cdot v_n^2]^{-0,333},$$

где  $Q_{H_m}^P$  – среднее значение низшей теплоты сгорания пожарной нагрузки, мДж/кг,

$v'_m$  – среднее значение массовой скорости выгорания пожарной нагрузки, кг/м<sup>2</sup>·с.

$$v'_m = \left( \sum_{i=1}^n q_{m_i} \cdot v'_{m_i} \right) / \sum_{i=1}^n q_{m_i},$$

где  $q_{m_i}$  – пожарная нагрузка отдельного вида материалов, кг/м<sup>2</sup>;

$v'_{m_i}$  – массовая скорость выгорания материалов в начальной стадии пожара, кг/м<sup>2</sup>·с;

$$Q_{H_m}^P = \left( \sum_{i=1}^n q_{m_i} \cdot Q_{H_i}^P \right) / \sum_{i=1}^n q_{m_i},$$

где  $Q_{H_i}^P$  – низшая теплота сгорания материала, мДж/кг;

$v'_d$  – скорость распространения пламени в начальной стадии пожара, м/с;

$\tau$  – время развития пожара в зависимости от высоты и объема помещения и от величины пожарной нагрузки:

$$q_m = \sum_{i=1}^n q_m^i \cdot Q_{H_i}^P / 13,8.$$

Для начальной стадии развития пожара зависимость массы выгоревших материалов от времени может быть выражена:

$$\mu(\tau) = A \cdot \tau^n,$$

где  $A$  и  $n$  зависят от формы поверхности горения и свойств материалов пожарной нагрузки.

Если фронт пламени распространяется, имея круговую форму, то

$$A = 0,67 \cdot v'_m \cdot \pi \cdot v'_d; n = 3.$$

При нестационарном горении жидкостей на площади  $F_n$ :

$$A = 0,67 \cdot v'_m \cdot F_n; n = 1,5.$$

При стационарном горении жидкостей на площади  $F_n$ :

$$A = v'_m \cdot F_n; n = 1.$$

Эти закономерности справедливы при быстром развитии пожара при пламенном горении материалов пожарной нагрузки.

Если эти зависимости применять при длительном тлении материалов, то можно получить значительную погрешность.

Динамику внутреннего пожара характеризуют по интенсивности газообмена.

Воздух, поступающий в помещение, разделяется как бы на две части:

- одна часть активно поддерживает и интенсифицирует процесс горения;
- другая часть вовлекается в движение внутренними конвективными потоками и в зону горения не поступает. Эта часть воздуха разбавляет продукты горения в объеме помещения и влияет на снижение температуры пожара. Количество воздуха, не участвующего в процессе горения,

учитывается коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$ ), который показывает во сколько раз в помещении воздуха больше, чем затрачивается для горения.

Интенсивность газообмена внутреннего пожара определяется с одной стороны конструктивными особенностями зданий: высотой проема ( $H_{np}$ ) или площадью оконных проёмов ( $F_{np}$ ) и их расположением, площадью пола помещения ( $F_{пола}$ ), высотой помещения ( $H_{п}$ ), с другой стороны – размерами самого пожара, в частности, его площадью ( $F_n$ ), соотношением между ними: и ( $F_n / F_{пола}$ ;  $F_{np} / F_n$ ;  $F_{np} / F_{пола}$ ). Интенсивность газообмена определяет скорость роста и абсолютное значение массовой скорости выгорания, полноту горения, а значит и температуру пожара.

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

При условиях газообмена, близких к открытым пожарам, массовая скорость выгорания не зависит от размеров проёма, а температура пожара достигает максимума, и равна температуре открытого пожара.

### 4.3. Расчет основных параметров пожара

#### 4.3.1. Расчёт величины пожарной нагрузки

Массовая пожарная нагрузка – это количество (масса) горючих материалов, приведённая к единице площади помещения ( $\text{кг}/\text{м}^2$ );

$$P_{ГН} = \frac{\sum m_i}{F_{пола}},$$

где  $P_{ГН}$  - горючая нагрузка,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$m_i$  - масса  $i$ -ого горючего вещества, кг;

$F_{пола}$  - площадь пола,  $\text{м}^2$ .

#### Задача 1:

Рассчитать величину массовой пожарной нагрузки столярной мастерской размерами 10x15 м, если известно, что пожарная нагрузка состоит из древесного пола, толщина досок 0,04 м, покрытого линолеумом толщиной 0,002 м, двух столярных верстаков массой 50 кг каждый и стеллажа массой 90 кг, плотность древесины равна  $\rho_{др} = 450 \text{ кг}/\text{м}^3$ , а линолеума  $\rho_{лин} = 1250 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

#### Решение:

1. Рассчитать суммарную массу горючих материалов:

$$m_{др} = 0,04 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 450 = 2700 \text{ кг};$$

$$m_{лин} = 0,002 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 1250 = 300 \text{ кг};$$

$$\sum m_i = 2700 + 300 + 54 \cdot 2 + 85 = 3193 \text{ кг}.$$

2. Рассчитать величину пожарной нагрузки:

$$P_{ГН} = \frac{\sum m_i}{F_{пола}} = \frac{3193}{150} = 21,3 \text{ кг/м}^2.$$

Ответ:

$$P_{ГН} = 21,3 \text{ кг/м}^2.$$

#### 4.3.2. Расчет тепловой пожарной нагрузки

Тепловая пожарная нагрузка – это количество тепла, которое выделяется при сгорании 1 кг пожарной нагрузки с единицы площади пола помещения (МДж/м<sup>2</sup>):

$$q_{Г.Н.} = \frac{\sum Q_{ni}}{F_{пола}},$$

где  $q_{ГН}$  - тепловая горючая нагрузка, МДж/м<sup>2</sup>;

$F_{пола}$  - площадь пола, м<sup>2</sup>;

$Q_{Ni}$  - низшая теплота сгорания i-ого горючего материала, МДж/кг.

Учитывая массу горючей пожарной нагрузки, тепловую пожарную нагрузку можно рассчитать:

$$q_{ГН} = \frac{\sum m_i \cdot Q_{ni}}{F_{пола}} = \sum P_{ГН_i} \cdot Q_{Ni}.$$

Задача 1:

Расчитать тепловую пожарную нагрузку в жилом помещении размерами 5х6 м, в котором находится диван массой 65 кг, кресло мягкое массой 8 кг, стол двухтумбовый из досок массой 10 кг, книги – 70 кг, пол покрыт линолеумом, масса которого равна 25 кг.

Решение:

1. Рассчитать тепловую пожарную нагрузку:

$$Q_{Н.ор} = 16500 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{Н.войлок} = 13400 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{Н.бумага} = 13800 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{Н.лин} = 33400 \text{ кДж/кг};$$

$$q_{Г.Н.} = \frac{65 \cdot 16,500 + 13,400 \cdot 8 + 16,500 \cdot 10 + 70 \cdot 13,800 + 25 \cdot 33,400}{30} = 104,8 \text{ МДж/м}^2.$$

Ответ:

$$q_{Г.Н.} = 104,8 \text{ МДж/м}^2.$$

#### 4.3.3. Расчёт коэффициента поверхности горения

Поверхность горения – это поверхность пожарной нагрузки, с которой может происходить выделение газообразных летучих продуктов разложения или испарения при горении ( $F_{ПГ}$ , м<sup>2</sup>).

Площадь пожара – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость ( $F_n$ , м<sup>2</sup>).

Коэффициент поверхности горения элемента пожарной нагрузки - это есть отношение поверхности горения к её проекции на горизонтальную плоскость (иногда на вертикальную):

$$K_{П_i} = \frac{F_{ПГ_i}}{F_{П_i}}$$

где  $F_{ПГ_i}$  – площадь поверхности горения  $i$ -ого элемента пожарной нагрузки, м<sup>2</sup>;

$F_{П_i}$  – площадь пожара элемента пожарной нагрузки, м<sup>2</sup>.

Коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки равен отношению суммарной площади поверхности горения к площади пола помещения:

$$K_{П} = \frac{\sum F_{ПГ_i}}{F_{пола}} = \frac{\sum F_{ПГ_i} \cdot K_{ПГ_i}}{F_{пола}}$$

Коэффициенты поверхности горения отдельных элементов пожарной нагрузки приведены в справочной литературе.

#### Задача 1:

Рассчитать площадь поверхности горения ( $F_{ПГ}$ ) диван-кровати, если  $K_{ПГ}=5,7$ . Размеры дивана 2,0х0,6х1,3 м.

#### Решение:

1. Площадь проекции горящего дивана на горизонтальную плоскость ( $F_{n_1}$ ) будет равна:

$$F_{n_1} = 2,0 \cdot 0,6 = 1,2 \text{ м}^2;$$

$$F_{ПГ_1} = 1,2 \cdot K_{ПГ} = 1,2 \cdot 5,7 = 6,84 \text{ м}^2.$$

2. Площадь проекции дивана на вертикальную плоскость ( $F_{П_2}$ ) будет равна:

$$F_{П_2} = 0,6 \cdot 1,3 = 0,78 \text{ м}^2,$$

$$F_{ПГ_2} = 0,78 \cdot 5,7 = 4,45 \text{ м}^2.$$

#### Ответ:

$$F_{ПГ_1} = 6,84 \text{ м}^2, \quad F_{ПГ_2} = 4,45 \text{ м}^2.$$

#### Задача 2:

Рассчитать коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки, находящейся в помещении с размерами 8х6 м и состоящей из двух мягких кресел с размерами 0,45х0,45х0,75 м, дивана – 2х0,8х0,9 м, стульев деревянных 0,4х0,4х0,82 м в количестве 4 шт, шкафа платяного – 1,2х0,45х1,85 м. Коэффициенты поверхности горения каждого элемента пожарной нагрузки равны:  $K_{ПГ_{кр}} = 8,4$ ,  $K_{ПГ_{див}} = 6,2$ ,  $K_{ПГ_{ст}} = 4,5$ ,  $K_{ПГ_{шк}} = 8,1$ .

#### Решение:

$$\begin{aligned}\sum F_{\text{III}i} &= 0,45 \cdot 0,45 \cdot 2 \cdot 8,4 + 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 6,2 + 0,4 \cdot 0,4 \cdot 4 \cdot 4,5 + 1,2 \cdot 0,45 \cdot 8,1 = \\ &= 3,28 + 9,92 + 2,88 + 4,37 = 20,45 \text{ м}^2; \\ K_{\text{III}} &= \frac{20,45}{36} = 0,6.\end{aligned}$$

Ответ:

$$K_{\text{III}} = 0,6.$$

Задача 3:

Рассчитать коэффициент поверхности горения штабеля, состоящего из 30 брусьев размером 0,1х0,3х4,0 м, уложенных в штабель в 5 рядов. Плотность древесины равна 450 кг/м<sup>3</sup>.

Решение:

1. Рассчитать массу брусьев:

$$m = 0,1 \cdot 0,3 \cdot 4,0 \cdot 450 = 1620 \text{ кг}.$$

2. Рассчитать площадь поверхности горения штабеля:

$$F_{\text{III}} = F_{\text{общ}} - F_c,$$

где  $F_{\text{общ}}$  - общая поверхность брусьев;

$F_c$  - скрытая поверхность брусьев.

$$F_{\text{общ}} = [(0,1 \cdot 0,3 \cdot 2) + 0,1 \cdot 4 + 2 + 0,3 \cdot 4 \cdot 2] \cdot N = [0,06 + 0,8 + 2,4] \cdot 30 = 97,8 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{скр}} = 0,1 \cdot 6 \cdot 4 + 0,1 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 8 + 0,3 \cdot 4 \cdot 10 = 2,4 + 19,2 + 12 = 33,6 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{III}} = 97,8 - 33,6 = 64,2 \text{ м}^2;$$

$$K_{\text{III}n} = \frac{F_{\text{III}}}{F_n} = \frac{64,2}{0,1 \cdot 6 \cdot 4} = 27,0.$$

Ответ:

$$K_{\text{III}} = 27,0.$$

#### 4.3.4. Расчёт площади внутреннего пожара

При расчёте площади пожаров в помещении принимается ряд допущений:

1. Пожарная нагрузка в помещении распределена равномерно по всей площади пола.

2. Фронт пламени распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Площадь пожара в зависимости от места расположения очага и времени развития может иметь форму круга, полукруга, сектора, прямоугольника.

3. Линейная скорость распространения пожара в первые 10 минут свободного развития пожара равна половине заданного значения.

4. При достижении ограждающих конструкций фронт пламени спрямляется.

Площадь пожара в зависимости от его формы рассчитывается по следующим формулам:

а)  $F_n = \pi l_\tau^2$  – при круговой форме пожара;

б)  $F_n = \frac{1}{4} \pi l_\tau^2$  – пожар имеет форму сектора;

в)  $F_n = \frac{1}{2} \pi l_\tau^2$  – пожар имеет форму полукруга;

г)  $F_n = a l_\tau$  – пожар имеет форму одностороннего прямоугольника;

д)  $F_n = 2 l_\tau \cdot a$  – пожар имеет форму двустороннего прямоугольника;

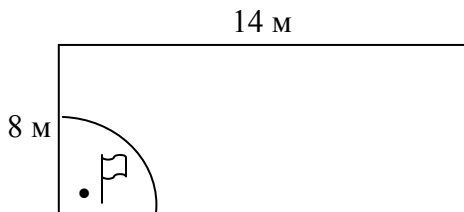
$a$  – ширина помещения, м;

$l_\tau$  – расстояние, пройденное фронтом пламени на данный момент времени.

### Задача 1:

Рассчитать площадь пожара при его свободном развитии на 8, 18, 25 минутах в помещении размером 8x14 м. Предполагаемое место возникновения пожара – угол комнаты, линейная скорость распространения пламени равна 0,8 м/мин.

### Решение:



1. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени за 8 минут:

$$l_8 = 0,5 \cdot v_n \cdot \tau = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 8 = 3,2 \text{ м.}$$

2. Рассчитать площадь пожара на 8 минуте с начала его развития:

$$F_{n8} = \frac{1}{4} \pi l_8^2 = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 3,2^2 = 8 \text{ м}^2$$

Пожар имеет форму сектора с радиусом, равным 3,2 м

3. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени за 18 минут:

$$l_{18} = 0,5 \cdot v_n \cdot 10 + v_n (\tau_{18} - \tau_{10}) = 4 + 6,4 = 10,4 \text{ м.}$$

Пожар имеет форму прямоугольника с размерами: 8x10,4 м.

4. Рассчитать площадь пожара на 18 минуте:

$$F_{n18} = 8 \times 10,4 = 83,2 \text{ м}^2.$$

5. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени за 25 минут:

$$l_{25} = 5 \cdot 0,8 + 0,8(25 - 10) = 4 + 12 = 16 \text{ м.}$$

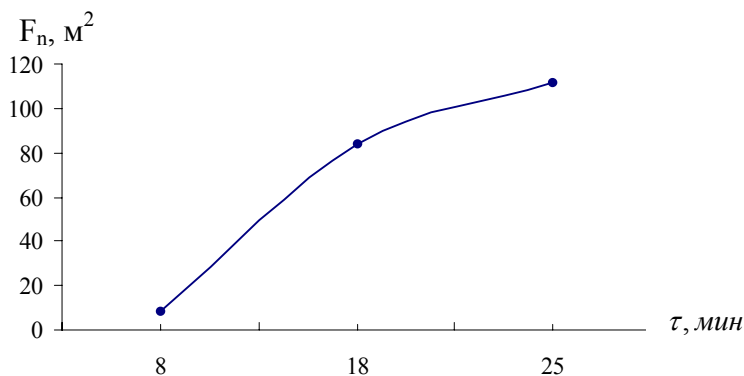
6. Рассчитать площадь пожара на 25 минуте:

Пожар охватит все помещение, и площадь пожара будет равна площади помещения:

$$F_{n25} = 8 \cdot 14 = 112 \text{ м}^2.$$

7. Построить график зависимости площади пожара от времени:

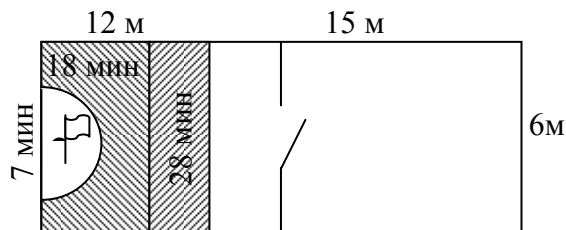
$\tau_n$	8	18	25
$F_n$	8	83,5	112



$$F_{n8} = 8 \text{ м}^2, \quad F_{n18} = 83,2 \text{ м}^2, \quad F_{n25} = 112 \text{ м}^2.$$

### Задача 2:

Рассчитать площадь пожара, развивающегося в здании сборного цеха, состоящего из двух помещений, разделённых капитальной стеной. В стене есть дверь, предел огнестойкости которой  $\tau_{OC} = 0,25$  ч.



Пожар возник у центра торцевой стены. Площадь пожара определить на 7, 12, 18, 35, 50 минутах. Построить график зависимости площади пожара от времени. Скорость распространения пожара равна 0,6 м/мин.

### Решение:

1. Рассчитать площадь пожара на 7-й минуте:

$$\ell_{\tau} = 0,5 \cdot v_n \cdot \tau = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 7 = 2,1 \text{ м}.$$

Пожар имеет форму полукруга:

$$F_{\tau} = \frac{1}{2} \pi \ell_{\tau}^2 = \frac{1}{2} 3,14 \cdot 2,1^2 = 6,9 \text{ м}^2.$$

2. Рассчитать площадь пожара на момент времени 12 минут:

$$\ell_{12} = 0,5 \cdot v_n \cdot \tau + v_n (12 - 10) = 0,5 \cdot 0,6 \cdot 10 + 0,6 \cdot 2 = 4,2 \text{ м}.$$

Площадь пожара будет равна площади прямоугольника:

$$F_n = 6 \cdot 4,2 = 25,2 \text{ м}^2.$$

3. Рассчитать площадь пожара на 18 минуте с начала его возникновения:

$$\ell_{18} = 0,5 \cdot v_n \cdot \tau + v_n (18 - 10) = 3 + 4,8 = 7,8 \text{ м}.$$

Площадь пожара будет равна площади прямоугольника:

$$F_{18} = 6 \cdot 7,8 = 46,8 \text{ м}^2.$$

4. До капитальной стены фронту пламени осталось пройти  $12 - 7,8 = 4,2$  м и время достижения будет равно



$$\tau = \frac{4,2}{0,6} = 7 \text{ мин.}$$

Следовательно, на 25 минуте с начала развития пожара площадь пожара равна площади помещения:

$$F_n = 6 \cdot 12 = 72 \text{ м}^2.$$

5. Через  $0,25 \cdot 60 = 15$  мин вскрыется дверной проем, т.е. через 40 минут, с начала пожара пламя перейдет во второе помещение, а до этого времени пожар будет в первом помещении. Следовательно, на 35 минуте площадь пожара будет равна площади помещения.

6. После вскрытия проёма пламя будет распространяться во втором помещении с табличной скоростью:

$$l_{50} = v_n(50 - 40) = 0,6 \cdot 10 = 6 \text{ м.}$$

Площадь пожара на 50 минуте будет равна площади прямоугольника

$$F_{50} = 12 \cdot 6 = 72 \text{ м}^2$$

для первого помещения и общая площадь пожара будет равна

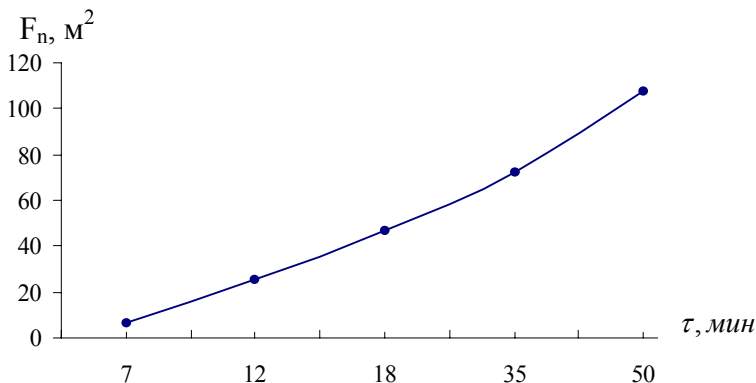
$$F_n = 72 + 36 = 108 \text{ м}^2,$$

т.к. во втором помещении площадь пожара будет равна

$$F_n = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2.$$

7. Построить график зависимости площади пожара от времени:

$\tau_n$	7	12	18	35	50
$F_n$	6,9	25,2	46,8	72	108



Ответ:

$$F_{П7} = 6,9 \text{ м}^2, \quad F_{П12} = 25,2 \text{ м}^2, \quad F_{П18} = 46,8 \text{ м}^2, \quad F_{П35} = 72 \text{ м}^2, \quad F_{П50} = 108 \text{ м}^2.$$

#### 4.3.5. Расчёт скорости распространения пожара

Массовая скорость выгорания пожарной нагрузки – это масса вещества, выгорающего в единицу времени с единицы поверхности горения,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Весь период пожара внутри помещения делится на 3 стадии:

– начальная, горение протекает за счёт воздуха, содержащегося в помещении.

– основная, вскрываются проёмы и газообмен активизируется до тех пор, пока в процесс горения не будет вовлечена вся горючая нагрузка.

– заключительная, уменьшается поверхность горения.

Продолжительность начального периода может быть оценена по формуле:

$$\tau_{нач} = \sqrt{\frac{V_{ПОМ} \cdot 60}{\frac{1}{2} v_l^{табл} \cdot v_m \cdot K_{II} \cdot V_g^o \cdot \alpha}},$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха,

$$\alpha = \frac{21}{21 - C_{O_2} - 0,5C_{CO_2} - 0,5C_{H_2} + 2C_{CH_4}},$$

где  $C_{O_2}$ ,  $C_{CO_2}$ ,  $C_{H_2}$ ,  $C_{CH_4}$  – концентрации данных соединений в продуктах горения при условии, что при  $C_{O_2} \approx 16\%$  горение прекращается, тогда

$$\alpha = \frac{21}{21 - 16} = 4,2.$$

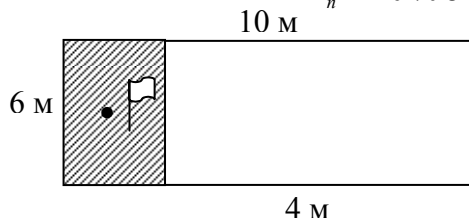
### Задача 1:

Установить скорость распространения пожара в помещении размерами 6x10 м, если пожар возник у стены, а на 12 минуте площадь пожара составила 40 % от всей площади помещения.

### Решение:

1. Площадь пожара на 12 минуте с начала развития составляет:

$$F_n = 40\% \text{ от } 60 \text{ м}^2 = 24 \text{ м}^2.$$



2. Предположим, что пожар имеет форму полукруга, тогда:

$$F_n = \frac{1}{2} \pi \ell^2; 24 = \frac{1}{2} \pi \ell^2; \ell^2 = \frac{24}{\frac{1}{2} \pi}; \ell = \sqrt{\frac{24 \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{30,5} = 5,5 \text{ м}.$$

Следовательно, форма пожара прямоугольная, т.к. ширина помещения меньше, чем  $2\ell$ .

3. Скорость распространения пламени равна

$$v_n = \frac{\ell}{\tau - 5}, \text{ т.к. время развития пожара больше 10}$$

минут,

$$v_n = \frac{4}{\tau - 7} = \frac{4}{12 - 5} = 0,6 \text{ м/мин}.$$

### Ответ:

$$v_n = 0,6 \text{ м/мин}.$$

### Задача 2:

Рассчитать время окончания начальной стадии пожара в помещении размерами 5x10x4 м, если пожарная нагрузка – древесина, состав которой С – 43 %, Н – 9 %, О – 48 %. Коэффициент поверхности горения равен 3, приведенная массовая скорость выгорания древесины равна 0,005 кг/м<sup>2</sup>·с,  $\alpha=4$ ,  $v_{л}=1$  м/мин.

#### Решение:

$$1. V_{\epsilon}^0 = 0,259 \cdot \left[ \frac{C}{3} + H - \frac{O}{8} \right] = 0,259 \cdot \left( \frac{43}{3} + 9 - \frac{48}{8} \right) = 0,259 \cdot (14,3 + 9 - 6) = 4,49 \text{ м}^3 / \text{кг},$$

где  $V_{\epsilon}^0$  - объём воздуха, необходимый для сгорания 1 кг древесины.

2. Рассчитать время окончания начальной стадии:

$$\tau = \sqrt{\frac{V_{\text{ПОМ}} \cdot 60}{\frac{1}{4} \cdot v_m' \cdot K_{\text{П}} \cdot 2 \cdot V_{\epsilon}^0 \cdot v_{л}^{\text{табл}}}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 60}{\frac{1}{4} \cdot 0,005 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4,49 \cdot 1}} = 422 \text{ с} = 7 \text{ минут}.$$

#### Ответ:

$\tau = 7$  минут.

### Задача 3:

Установить скорость распространения горения в помещении размером 6x14 м, пожар возник в центре, если на 16 минуте площадь пожара составила 60 % от площади помещения.

#### Решение:

1. Определить площадь пожара на 16 минуте:

$$F_n = 0,6 \cdot F_{\text{пола}} = 0,6 \cdot 6 \cdot 14 = 50,4 \text{ м}^2.$$

т.к. пожар возник в центре, то он может иметь круговую форму:

$$F_n = \pi \ell^2; \ell = \sqrt{\frac{F_n}{\pi}} = \sqrt{\frac{50,4}{3,14}} = \sqrt{16} = 4 \text{ м},$$

т.к. 4 м > 3 м, т.е. пожар достиг ограждающих конструкций, спрямился и имеет форму двустороннего прямоугольника

$$\ell = \frac{F_n}{2 \cdot 6} = \frac{50,4}{2 \cdot 6} = 4,2 \text{ м},$$

т. е. в каждую сторону фронт пламени переместился на 4,2 м.

Скорость распространения пожара равна:

$$v_{л} = \frac{\ell}{\tau - 5} = \frac{4,2}{16 - 5} = 0,7 \text{ м/мин}.$$

#### Ответ:

$v_{л} = 0,7$  м/мин.

### Задача 4:

Рассчитать линейную скорость распространения пожара в помещении размером 7x12 м на 15 минуте, если к этому времени площадь пожара составила 25 м<sup>2</sup>. Пожар возник в углу помещения. Определить площадь пожара на 8 и 20 минутах.

Решение:



им, что к 15 минуте пожар имеет форму

$$F_n = \frac{1}{4} \pi \ell^2; \quad \ell = \sqrt{\frac{4F_n}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 25}{3,14}} = \sqrt{31,8} = 5,6 \text{ м};$$

Так как  $5,6 < 7$ , пожар имеет форму сектора.

2. Линейная скорость распространения пожара равна:

$$v_n = \frac{\ell}{\tau - 5} = \frac{5,6}{15 - 5} = 0,56 \text{ м/мин}.$$

3. Рассчитать площадь пожара на 8-й минуте:

$$\ell_8 = \frac{1}{2} v_n \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot 0,56 \cdot 8 = 2,24 \text{ м},$$

$$F_8 = \frac{1}{4} \pi \ell^2 = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot 2,24^2 = 3,4 \text{ м}^2.$$

4. Рассчитать площадь пожара на 20-й минуте:

$$\ell_{20} = \frac{1}{2} v_n \cdot 10 + v_n (20 - 10) = \frac{1}{2} \cdot 0,56 \cdot 10 + 0,56 \cdot 10 = 2,8 + 5,6 = 8,4 \text{ м}.$$

Пожар уже достигнет ограждающие конструкции и спрямится, принимая форму прямоугольника:

$$F_{20} = 7 \cdot 8,4 = 70,56 \text{ м}^2.$$

Ответ:

$$F_8 = 3,4 \text{ м}^2, \quad F_{20} = 70,56 \text{ м}^2.$$

Задача 5:

Рассчитать линейную скорость распространения пламени, если через 25 минут после начала пожара фронт пламени переместится на 16 м.

Решение:

1. Рассчитать линейную скорость распространения пламени:

$$v_n = \frac{16}{\tau - 5} = \frac{16}{25 - 5} = 0,8 \text{ м/мин}.$$

Ответ:

$$v_n = 0,8 \text{ м/мин}.$$

Задача 6:

Определить линейную и массовую скорость выгорания керосина плотностью  $790 \text{ кг/м}^3$  в ёмкости, находящейся в помещении, если за 45 минут пожара уровень керосина понизился на 3 см.

Решение:

1. Определить линейную скорость выгорания керосина:

$$v_n = \frac{h}{\tau} = \frac{0,03}{45} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м/мин}.$$

2. Определить массовую скорость выгорания керосина

$$v_m = v_n \cdot \rho = 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot 790 \text{ кг/м}^3 = 0,527 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{мин} = 0,009 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} .$$

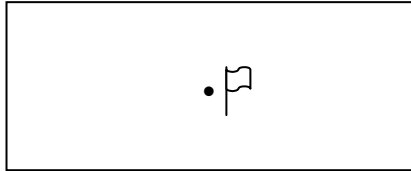
Ответ:

$$v_n = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м/мин}, \quad v_m = 0,009 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} .$$

Задача 7:

Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени на 2, 6 и 14 минутах, если известно, что на 20-й минуте пламя прошло 15 м.

Решение:



$$1. \ell_{20} = \frac{1}{2} v_n \cdot 10 + v_n \cdot 10,$$

$$v_n = \frac{\ell_{20}}{5 + 10} = \frac{15}{15} = 1 \text{ м/мин} .$$

2. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом:

$$\ell_2 = \frac{1}{2} v_n \cdot 2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 2 = 1 \text{ м} .$$

3. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени за 6 минут.

$$\ell_6 = \frac{1}{2} v_n \cdot 6 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 6 = 3 \text{ м} .$$

4. Рассчитать расстояние, пройденное фронтом пламени за 14 минут.

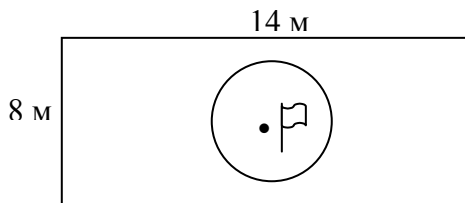
$$\ell_{14} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 10 + 1 \cdot 1 \cdot 4 = 9 \text{ м} .$$

Ответ:

$$\ell_2 = 1 \text{ м}, \quad \ell_6 = 3 \text{ м}, \quad \ell_{14} = 9 \text{ м} .$$

Задача 8:

Рассчитать время охвата пламенем всего помещения размером 8x14 м, если пожар возник в центре помещения. Скорость распространения пламени равна 0,6 м/мин.



Решение:

1. Рассчитать расстояние, которое пройдет фронт пламени за 10 минут:

$$\ell_{10} = \frac{1}{2} v_n \cdot 10 = 3 \text{ м},$$

Следовательно, пожар будет иметь форму круга.

2. До ограждающих боковых стен остаётся по 1 м, и пламя пройдёт их за время, равное

$$\tau_1 = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ мин.}$$

Следовательно, через время равное

$$\tau_2 = 10 + 1,25 = 11,25 \text{ мин}$$

фронт пламени спрямится и примет форму двустороннего прямоугольника.

3. До боковых стен остаётся по 3 м, пламя пройдет их за время:

$$\tau = \frac{3}{0,8} = 3,75 \text{ мин.}$$

Вывод: через время равное  $\tau_3 = 11,25 + 3,75 = 15$  мин, фронт пламени достигнет ограждающие конструкции и охватит все помещение.

Ответ:

$$\tau_3 = 15 \text{ мин.}$$

## 5.1. 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 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 ПТЭ (пожарно-технической экспертизы) 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.

В общем виде тепловой режим можно написать следующим образом:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi\Gamma} + Q_K + Q_L,$$

где  $Q_{\Pi}$  – количество тепла, выделяющегося на пожаре, кДж;

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

$Q_K$  – количество тепла, передаваемого из зоны горения конвекцией воздуху, омывающему зону горения, кДж:

$$Q_K = \alpha F_{\Pi} \Delta T;$$

$Q_L$  – количество тепла, передаваемого из зоны горения излучением, кДж.

При открытых пожарах доля тепла, передаваемого из зоны горения излучением и конвекцией, составляет 40-50 % от  $Q_{\Pi}$ . Оставшиеся 60-50 % идут на нагрев горючего вещества. Температура открытых пожаров зависит от теплотворной способности горючих материалов, скорости их выгорания, метеоусловий. В среднем, температура открытого пожара газов равна 1200-1350 °С, жидкостей – 1100-1300 °С, твердых веществ – 1100-1250 °С.

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.

На начальной стадии пожара для расчета температуры пожара предпочтительнее использовать более простые расчеты. Изменение температуры газовой среды по высоте помещения при пожаре в зависимости от ее среднеобъемного значения в заданный момент времени может быть выражено формулой:

$$T(h) = T_0 + \left[ (T_n - T_0) \cdot \frac{h}{H} \right] \cdot \exp\left(1,3 \frac{h}{H}\right),$$

где  $T(h)$  – температура на высоте  $h$ , К;

$T_0$  – начальная температура в помещении, К;

$h$  – высота над уровнем пола, где определяется температура пожара, м;

$H$  – высота помещения, м.

На начальной стадии быстро развивающегося пожара вследствие повышения температуры происходит вытеснение продуктов горения через неплотности и открытые проемы. С учетом этого было получено выражение для определения динамики изменения температуры пожара во времени:

$$T_n = T_0 \cdot \exp\left(\frac{(1-\gamma) \cdot \beta \cdot Q_H^p \cdot \mu(\tau)}{C_p \cdot V_{св.н.} \cdot \rho_0 \cdot T_0}\right),$$

где  $T_0$  – начальная температура в помещении, К;

$\rho_0$  – плотность воздуха при температуре  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;

$V_{св.н.}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – коэффициент, учитывающий отношение количества тепла, поступающего к ограждающим конструкциям, к количеству тепла, выделяющегося в очаге горения; для начальной стадии пожара  $\gamma=0,55$ ;

$\mu(\tau)$  – масса выгоревших к данному моменту времени материалов пожарной нагрузки помещения, кг;

$\beta$  – коэффициент полноты сгорания, на начальной стадии  $\beta=0,7$ ;

$C_p$  – удельная теплоемкость, кДж/кг·К.

Для начальной стадии развития пожара зависимость массы выгоревших материалов от времени может быть выражена:

$$\mu(\tau) = A \cdot \tau^n,$$

где  $A$  и  $n$  зависят от формы поверхности горения и свойств материалов пожарной нагрузки.

Если фронт пламени распространяется, имея круговую форму, то

$$A = 0,67 \cdot v_m' \cdot \pi \cdot v_n; n = 3.$$

При нестационарном горении жидкостей на площади  $F_n$ :

$$A = 0,67 \cdot v_m' \cdot F_n; n = 1,5.$$

При стационарном горении жидкостей на площади  $F_n$ :

$$A = v_m' \cdot F_n; n = 1.$$



Эти закономерности справедливы при быстром развитии пожара при пламенном горении материалов пожарной нагрузки.

Если эти зависимости применять при длительном тлении материалов, то можно получить значительную погрешность.

Изменение соотношения площади проёмов к площади пожара в сторону увеличения  $\left(\frac{F_{np}}{F_n}\right)$  приводит к росту температуры пожара, а уменьшение этого отношения приводит к увеличению продолжительности пожара. По интенсивности газообмена, которая определяет скорость роста температуры пожара, все помещения можно разделить на две группы:

1. Помещения, в которых отношение площади проёмов к площади пола меньше  $\frac{1}{12} \cdot \left(\frac{F_{np}}{F_{пола}} < \frac{1}{12}\right)$ , относятся к помещениям с низкотемпературным режимом.

2. Помещения, у которых отношение  $\left(\frac{F_{np}}{F_{пола}} > \frac{1}{12}\right)$ , относятся к помещениям с высокотемпературным режимом пожаров.

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 интенсивный 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.

## 5.2. Тепловой баланс внутреннего пожара

Тепловой баланс составляют для того, чтобы выявить количественное распределение тепловой энергии на пожаре.

В общем виде тепловой режим можно написать следующим образом:

$$Q_{\Pi} = Q_{\Pi\Pi} + Q_{\kappa} + Q_{\Delta},$$

где  $Q_{\Pi}$  – количество тепла, выделяющегося на пожаре, кДж;

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

$Q_{\kappa}$  – количество тепла, передаваемого из зоны горения конвекцией воздуху, омывающему зону горения, кДж:

$$Q_{\kappa} = \alpha F_{\Pi} \Delta T;$$

$Q_{\Delta}$  – количество тепла, передаваемое из зоны горения излучением, кДж.

При открытых пожарах доля тепла, передаваемого из зоны горения излучением и конвекцией, составляет 40-50 % от  $Q_{\Pi}$ . Оставшиеся 60-50 % идут на нагрев горючего вещества. Температура открытых пожаров зависит от теплотворной способности горючих материалов, скорости их выгорания, метеоусловий. В среднем, температура открытого пожара газов равна 1200-1350 °С, жидкостей – 1100-1300 °С, твердых веществ – 1100-1250 °С.

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

$$Q_n = Q'_{\Pi\Pi} + Q''_{\Pi\Pi} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{ГМ}} + Q_{\text{изл}},$$

где  $Q_n$  – тепло, выделяющееся на пожаре, кДж;

$Q'_{\Pi\Pi}$  – тепло, поглощаемое продуктами горения, которые удаляются из помещения, где произошел пожар, кДж;

$Q''_{\Pi\Pi}$  – тепло продуктов горения, которые находятся в помещении, кДж;

$Q_{\text{кон}}$  – тепло, расходуемое на нагрев конструкций за счет излучения, кДж;

$Q_{\text{ГМ}}$  – тепло, которое поступает к горючим веществам и материалам за счет конвекции и излучения, кДж;

$Q_{\text{изл}}$  – тепло, которое излучается из зоны горения за предел помещения 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  $Q''_{\Pi\Pi}$ , т.к. продукты горения распределяются по всему помещению.

$Q_{ГМ}$  – этот тепловой поток невелик, но очень опасен, сведение его к нулю приводит к локализации пожара и его тушению;

$Q_{КОН}$  – 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.

$Q'_{ПГ}$  и  $Q_{ИЗЛ}$  – не учитывают, т.к. тепло уходит за пределы помещения и на температуру пожара не влияет.

Для расчета приближенного значения температуры пожара исходят из предпосылки, что температура пожара обусловлена разностью:

$$Q_{П} - (Q'_{ПГ} + Q_{ИЗЛ} + Q_{КОН} + Q_{ГМ}) = Q''_{ПГ}.$$

Величина тепловых потерь:  $Q'_{ПГ}$ ,  $Q_{ИЗЛ}$ ,  $Q_{КОН}$ ,  $Q_{ГМ}$  выражается как доля тепловых потерь ( $m$ ) от теплоты пожара, т.е.:

$$Q'_{ПГ} + Q_{ИЗЛ} + Q_{КОН} + Q_{ГМ} = mQ_n,$$

тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q_{П} = Q''_{ПГ} + mQ_n.$$

Тепло, которое затрачивается на нагрев дыма (продуктов горения) и воздуха в помещении, можно определить из уравнения:

$$Q''_{ПГ} = v'_m \cdot F_n \cdot C_p [V_{ПГ} + V_0(\alpha - 1)](t_{П} - t_H),$$

тогда

$$\beta \cdot Q_H \cdot v'_m \cdot F_n = v'_m \cdot F_n C_p [V_{ПГ} + V_0(\alpha - 1)](t_n - t_H) + m\beta \cdot Q_H v'_m \cdot F_n,$$

$$t_n = \frac{Q_H(1-m)\beta}{C_p [V_{ПГ} + V_0(\alpha - 1)]} + t_H.$$

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

Если задаться условием, что  $C_p$  – это среднеобъемная удельная теплоемкость смеси газов, то  $t_n$  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.

### **5.3. Пожары, регулируемые нагрузкой и вентиляцией**

В зависимости от соотношения массы горючего вещества и количества воздуха, пожар может протекать в двух режимах:

1) Когда приток воздуха достаточен для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего, то массовая скорость выгорания не зависит от интенсивности газообмена, а так как теплота пожара прямо пропорциональна массовой скорости выгорания, она также зависит только от вида горючего материала и плотности его укладки. Такие пожары называются регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН).

При свободном развитии пожара в таком режиме уровень интенсивности газообмена с окружающей средой устанавливается в соответствии со скоростью образования продуктов горения. Если увеличить приток воздуха (с помощью дымососа), то температура пожара снижается, т.к. воздух более холодный. Если при этом режиме вскрыть один или несколько проемов, то среднеобъемная температура тоже понизится. В этом случае возрастает количество тепла, удаляемого вместе с продуктами горения ( $Q'_{ПГ}$ ), а так как  $Q_{П}$  при ПРН не изменяется, тепловой баланс будет восстанавливаться за счет уменьшения  $Q'_{ПГ}$  и  $Q_{КОНСТР}$ .

2) В тех случаях, когда интенсивность газообмена ограничивает массовую скорость выгорания, т.е. приток воздуха не обеспечивает максимальную полноту сгорания горючих материалов, пожар называется

регулируемым вентиляцией (ПРВ). Увеличение интенсивности газообмена при ПРВ вызовет рост массовой скорости выгорания, интенсивности тепловыделения и, соответственно, среднеобъемной температуры в помещении. Снизить температуру можно путем интенсивной принудительной вентиляции помещения, т.е. переход от ПРВ к ПРН. Однако в помещении будет расти давление, и будет возрастать опасность распространения пожара за пределы помещения, особенно, если ограждающие конструкции имеют низкую огнестойкость.

Следовательно, если установить в каком режиме наиболее вероятно развитие пожара, то можно заранее определить как изменится температура в помещении при вскрытии проемов или при применении дымососа.

Режим пожара зависит от величины пожарной нагрузки, от её размещения по площади помещения и от параметров помещения.

Вид объёмного пожара определяется из соотношения:

- 1)  $P_k < P_{к.кр}$  – пожар, регулируемый нагрузкой (ПРН);
- 2)  $P_k \geq P_{к.кр}$  – пожар, регулируемый вентиляцией (ПРВ).

$P_k$  – пожарная нагрузка, приведенная к древесине, приходящаяся на  $1\text{ м}^2$  ограждающих конструкций:

$$P_k = \sum P_i \cdot Q_{Hi} / (6F_{пола} - \sum F_{i,пр}) \cdot Q_{н.др} ,$$

где  $P_i$  – общее количество  $i$ -горючего вещества, кг;

$Q_{Hi}$  – низшая теплота сгорания вещества или материала,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$Q_{н.др}$  – низшая теплота сгорания древесины,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ ;

$P_{к.кр}$  – критическая пожарная нагрузка, определяется из выражения:

$$P_{к.кр} = \frac{4500\Pi^3}{1 + 500\Pi^3} + \frac{V^{0.333}}{6V_г^0} ,$$

$V_г^0$  – количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг материала  $i$ -ой пожарной нагрузки;

$V$  – объём помещения,  $\text{м}^3$ ;

$\Pi$  – проёмность помещения,  $\text{м}^{0.5}$ .

Проёмность помещения рассчитывается в зависимости от помещения, если  $V \leq 10 \text{ м}^3$ , тогда

$$\Pi = \frac{\sum F_{i,пр} h_i^{0.5}}{V^{0.667}} ,$$

где  $F_{i,пр}$  – площадь  $i$ -го проёма;

$h_i$  – высота  $i$  го проёма.

Если объём помещения больше  $10 \text{ м}^3$ , т.е.  $V > 10 \text{ м}^3$ , тогда

$$\Pi = \sum F_{i,np} \cdot h_i^{0,5} / F_{\text{пола}}$$

где  $F_{\text{пола}}$  – площадь пола помещения.

Если пожар регулируется пожарной нагрузкой, то при увеличении притока воздуха температура в помещении будет понижаться. Если пожар регулируется вентиляцией, то температура в помещении будет возрастать.

При пожарах, регулируемых пожарной нагрузкой (ПРН), максимальную среднеобъёмную температуру определяют по формуле:

$$t_{\text{max}} - t_0 = 224 P_{\kappa}^{0,528}.$$

Время достижения максимального значения среднеобъёмной температуры для ПРН определяют из выражения:

$$\tau_{\text{max}} = 32 - 8,1 \cdot P_{\kappa}^{3,2} \cdot e^{-0,92 P_{\kappa}},$$

для пожаров регулируемых вентиляцией (ПРВ):

$$t_{\text{max}} = 940 e^{4,7 \cdot 10^{-3} (P - 30)},$$

где  $P$  – пожарная нагрузка, отнесённая к площади пола, кг/м<sup>2</sup>.

Время достижения  $t_{\text{max}}$  при ПРВ рассчитывается из выражения:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{P_{\kappa} \cdot F_{\text{опр}}}{330 \cdot \sum F_{np} \sqrt{h_i}},$$

где  $F_{\text{опр}}$  – площадь ограждающих конструкций, м<sup>2</sup>;

$F_{np}$  – площадь проёма, м<sup>2</sup>;

$h$  – приведённая высота проёмов, м:

$$h = \frac{\sum h_i F_{\text{ПР}}}{\sum F_{\text{ПР}}}.$$

Изменение среднеобъёмной температуры в помещении на заданный момент времени рассчитывают из выражения:

$$\frac{t - t_0}{t_{\text{max}} - t_0} = 115,6 \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} \right)^{4,75} \cdot e^{-4,75 \left( \frac{\tau}{\tau_{\text{max}}} \right)},$$

где  $t$  – температура в помещении в заданный момент времени, °С;

$t_0$  – начальная температура в помещении, °С;

$\tau$  – время с начала пожара, мин;

$\tau_{max}$  – время достижения максимальной температуры в помещении, мин.

Из этого выражения можно определить температуру пожара на любой момент времени и построить график зависимости температуры пожары от времени.

#### **5.4. Особенности горения пожарной нагрузки**

Горение материалов и веществ, составляющих пожарную нагрузку, является неотъемлемым признаком любого пожара независимо от того, протекает он в пламенном или беспламенном режиме.

После того, как горения возникло, фронт пламени распространяется по непрерывно или дискретно распределенным материалам пожарной нагрузки. Этот процесс сопровождается увеличением температуры и плотности задымления помещения со скоростью, зависящей от тепловой мощности очага пожара, свойств и распределения пожарной нагрузки, условий воздухообмена. Для активного горения материалов требуется довольно много воздуха: 5-8 м<sup>3</sup> на 1 кг горючих материалов типа древесины, пластмасс, нефтепродуктов. Поэтому при закрытых дверях и окнах, при накрывании очага горения плотной кошмой процесс горения замедляется, наблюдается сильное сажеобразование, горение может полностью прекратиться. При наличии в очаге пожара материала, способного к тлению, может образоваться очаг тления, который разрастается с небольшой скоростью вдоль слоя материала. В виде пламенного горения очаг может выйти в совсем неожиданном месте за десятки метров от места возникновения.

При хорошем воздухообмене следы, характерные для динамично развивающегося горения, формируются над очагом под действием конвективных потоков раскаленных газов.

По мере развития пожара происходит прогрев потолков и формирование под ним раскаленного слоя дыма и газов, излучающих тепло на материалы, расположенные внизу. При достижении температуры 500-550 °С происходит полный охват помещения пламенем, так называемая "общая вспышка".

Горение развивается преимущественно в восходящем направлении, поэтому при поиске очага пожара во всех случаях следует стремиться обнаружить самую низшую точку, где имеются следы горения в виде обгораний, сквозных прогаров, наличие очагового конуса и т.д. Но следует учесть, что такое развитие пожара может проявиться не всегда.

Пожарная нагрузка может состоять из древесины. Древесина является одним из наиболее распространенных материалов. При 110 °С из нее начинают выделяться термические продукты разложения и происходит изменение цвета в сторону потемнения. Начало тления соответствует температуре на поверхности порядка 300 °С, самовоспламенение горючих

газов может происходить при 380-400 °С. Переугленный слой теряет исходную прочность и плотность, а его глубина является основной объективной характеристикой степени термического поражения материала.

По глубине выгорания изделий и конструкций из древесины можно произвести сравнительную оценку степени их повреждения, а также оценить вероятную продолжительность выгорания. Принято считать, что при установившемся режиме самостоятельного горения линейная скорость горения древесины составляет от 0,63 до 1 мм/мин.

Для интенсификации горения древесины необходимы приток воздуха, без которого горение будет происходить в беспламенной форме. Такой режим горения характерен для заглубленных балок и закладных деталей.

Так как теплопроводность древесины вдоль волокон (с торца) в несколько раз выше, чем поперек волокон, значит, и прогревание материала происходит более интенсивно, следовательно, и прогорание древесины более интенсивно происходит с торцевой части. Наиболее интенсивно древесина горит на участках, пораженных гнилью. При выгорании деревянных конструкций (несущие балки, каркасы, настилы полов) осыпаются болты, гвозди, крепежные скобы, скопление которых может рассматриваться как признак очага пожара.

При кирпичных кладках начало образования трещин соответствует температуре прогрева 700 °С для силикатного кирпича и 800-900 °С для обычного глиняного кирпича, который начинает слегка растрескиваться по поверхности, при этом более интенсивное растрескивание происходит в слое цементно-песчаного раствора. Быстрое разрушение кладки на толщину 10-15 мм со скалыванием фрагментов начинается при температуре выше 1000 °С.

Гипсовая штукатурка при температуре 200-300 °С начинает покрываться сеткой трещин, которые интенсивно раскрываются при прогреве до 600-700 °С. Цементно-песчаная штукатурка как и бетон при 400-600 °С приобретает розоватый оттенок, а при температуре выше 800 °С – бледно-серый. Вместе с известковой штукатуркой после прогрева до 600-800 °С отслаивается тонкий слой сажистых отложений, а если температура превышала 900 °С, отслоение становится толще.

При постукивании молотком по бетону, поврежденному огнем, звук получается сравнительно высокого тона. С увеличением степени разрушения звук становится глуше, а сила отскока молотка от бетона уменьшается. При температуре выше 600 °С бетон начинается сминаться от удара молотка, часть материала может скалываться. Образование трещин начинается при температуре 300-400 °С, при температуре больше 800 °С их ширина может достигать 1 мм. Тяжелый бетон при температуре до 300 °С приобретает розоватый оттенок, в интервале температур 400-600 °С – красноватый, а при температуре примерно равной 900-1000 °С становится бледно-серый.

При интенсивном огневом воздействии может быть взрывообразное разрушение бетона, которое может произойти через 10-20 минут при



температуре 700-900 °С и повторяется через некоторое время на смежных участках. В начальной стадии пожара на конструкциях могут быть очаговые признаки.

Для конструкций из металла следует иметь в виду, что деформации происходят в направлении к источнику тепла. Но наибольшая деформация (наибольший прогиб) может быть там, где металлический элемент имеет большую нагрузку или большую степень свободы. При нагревании до 200-300 °С и последующего остывания поверхность стали имеет характерную окраску – цвета побежалости. При нагреве до 220-230 °С – светло-желтый, 231-240 °С – соломенно-желтый, 241-260 °С – оранжевый, 261-280 °С – красно-фиолетовый, 281-300 °С – синий. Эти явления объясняются интердиффузионными явлениями при отражении света поверхностью окисной пленки и поверхностью металла, находящегося под пленкой. При более высоких температурах нагрева окисная пленка теряет прозрачность и цвета побежалости исчезают. Наружная поверхность окисленной сероуглеродной стали, нагревавшейся до температуры выше 700 °С, остается гладкой, при дальнейшем нагревании приобретает шероховатость. Признаком столь высокого нагрева может являться пузырчатость поверхности окарины.

ЛВЖ и ГЖ часто применяются в качестве веществ, интенсифицирующих или ускоряющих горение. Чаще всего для этого используют бензин, керосин, дизельное топливо. Высокая температура в зоне горения приводит к интенсивному испарению жидкостей. На пожаре остаются остатки, сорбированные древесиной, тканями, грунтом, которые и следует исследовать.

В зонах интенсивного горения, где температура ограждений достигает 600 °С, на них не наблюдаются сажевые отложения. По размерам и форме наслоений, их толщине оцениваются динамика и условия развития пожара, местонахождение очага пожара относительно каждой ограждающей конструкции.

Лакокрасочные покрытия при термическом воздействии начинают темнеть вследствие разложения и переугливания органической части. При температуре 400 °С процесс выгорания органической части интенсифицируется и цвет покрытия бледный, возвращаясь к первоначальному, обусловленному минеральными пигментами, условия воздухообмена влияния на этот процесс не оказывают.

Оплавления. При температуре 330-350 °С оплавляется и затвердевает в виде капель свинец; 400-430 °С – цинк; 600-650 °С – алюминий; 950-960 °С – серебро; 900-1000 °С – латунь; 1000-1100 °С – медь и бронза; 1100-1200 °С – чугун.

Витринное, посудное стекло плавится при температуре 700-750 °С; обычное оконное и армированное – при 800-850 °С. Стеклянная колба эл. лампы будет интенсивнее оплавляться со стороны высокой температуры, также может оплавиться и бутылочное стекло. Полиэтилен, полистирол

плавятся при 100-130 °С, каучук – при 125 °С, полиуретан – при 180 °С, олово – 232 °С, нейлон и лавсан – при 250 °С. При нагревании стекол окон до 300 °С и выше они начинают разрушаться и выпадать в сторону действия источника нагрева. Так, при горении внутри, они будут падать внутрь помещения, это может быть ошибочно воспринято как признак разбивания стекла от удара снаружи. Надо иметь в виду то, что так как высокая температура развивается в верхнем притолочном слое дыма, то и остекление разрушается с верхнего уровня. Установить было ли остекление до начала горения, позволяет слой копоти на поверхности стекла со стороны очага пожара.

Полимерные конструкционные материалы – полиэтилен, поливинилхлорид, полиметилметаакрилат, полиамиды при нагревании плавятся, не разрушаясь. Так ведут себя провода с полиэтиленовой или ПВХ-изоляцией. Такая изоляция при нагревании плавится, стекает, жилы провода оголяются, происходит короткое замыкание, могут возникнуть вторичные короткие замыкания. Или, например, люминисцентные светильники с экраном из оргстекла. Конвективные потоки могут их прогреть до плавления и могут возникнуть множественные очаги. Если при осмотре обнаруживают потеки термопласта, это значит, что температура нагрева была больше температуры размягчения. Оплавление и обугливания изоляции по наружной поверхности является следствием термического воздействия пожара. Если изоляция оплавляется и обугливается изнутри, со стороны жилы – это нагрев жилы за счет тока короткого замыкания или перегрузок.

## 5.5. Расчет температуры пожара

### Задача 1:

Определить, как может измениться среднеобъёмная температура в помещении, если увеличить приток воздуха. Размеры помещения 10x20x3,5 м, число проёмов – 3, размеры одного проёма 2,1x1,6 м, горючий материал – бензин, масса горючего материала равна 20000 кг.

### Решение:

1. Рассчитать пожарную нагрузку ( $P_k$ ), приведённую к древесине для данного помещения:

$$P_k = \frac{\sum P_i Q_{Hi}}{(6F_{\text{пола}} - \sum F_{\text{ПР}}) \cdot Q_{н.др}};$$

$P_i = 20000$  кг – общее количество горючего вещества;

$Q_{Hi} = 41900$  кДж·кг<sup>-1</sup>;

$F_{\text{пола}} = 10 \times 20 = 200 \text{ м}^2$ ;

$\sum F_{\text{ПР}} = (2,1 \cdot 1,6) \cdot 3 = 10,08 \text{ м}^2$ ;

$Q_{н.др} = 16500$  кДж·кг<sup>-1</sup>;

$$P_k = \frac{20000 \cdot 41900}{(6 \cdot 200 - 10,08) \cdot 16500} = 42,7 \text{ кг/м}^2.$$

3. Рассчитать проёмность помещения, учитывая, что  $V > 10 \text{ м}^3$ :

$$П = \sum F_{инн} \cdot h_i^{0,5} / F_{пола} = \frac{10,08 \cdot 2,1^{0,5}}{200} = 0,07 \text{ м}^{0,5}.$$

3. Рассчитать критическую пожарную нагрузку:

$$P_{к.кр} = \frac{4500П^3}{1 + 500П^3} + \frac{V^{0,333}}{V_г^0},$$

где  $V_г^0 = 11,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$$V = 10 \cdot 20 \cdot 3,5 = 700 \text{ м}^3;$$

$$P_{к.кр} = \frac{4500 \cdot 0,07^3}{1 + 500 \cdot 0,07^3} + \frac{700^{0,333}}{11,60} = \frac{15435}{0,1715} + \frac{8,86}{11,60} = 9 + 0,76 = 9,76 \text{ кг/м}^2.$$

4. Сравнить  $P_к$  и  $P_{к.кр}$ :

$P_к > P_{к.кр}$  т.к.  $42,7 \text{ кг/м}^2 > 9,76 \text{ кг/м}^2$ , следовательно, в помещении пожар, регулируемый вентиляцией, среднеобъёмная температура в помещении будет возрастать.

Ответ:

Среднеобъёмная температура в помещении будет возрастать.

Задача 2:

Рассчитать значение среднеобъёмной температуры в помещении на 25 минуте с начала пожара, если известно, что размер помещения  $15 \times 32 \times 4 \text{ м}$ , размеры проемов  $1,6 \times 2,0 \text{ м}$ , число проёмов – 3, горючее вещество – бумага разрыхлённая в количестве  $10000 \text{ кг}$ , низшая теплота сгорания –  $13400 \text{ кДж/кг}$ , объём воздуха, необходимый для сгорания  $1 \text{ кг}$  бумаги равен  $3,95 \text{ м}^3/\text{кг}$ , массовая скорость выгорания древесины равна  $0,08 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .

Решение:

1. Определить режим пожара в помещении, для этого надо рассчитать:

а) Проёмность помещения, т.к.  $V = 15 \cdot 32 \cdot 4 = 1920 \text{ м}^3$ , что больше  $10 \text{ м}^3$ .

$$\begin{aligned} П &= \sum F_{инн} h_i^{0,5} / F_{пола}, \\ \sum F_{инн} &= (1,6 \cdot 2,0) \cdot 3 = 9,6 \text{ м}^2, \\ F_{пола} &= 15 \cdot 32 = 480 \text{ м}^2, \\ П &= 9,6 \cdot 2,0^{0,5} / 480 = 0,03 \text{ м}^{0,5}. \end{aligned}$$

б) Рассчитать критическую пожарную нагрузку:

$$P_{к.кр} = \frac{4500П^3}{1 + 500П^3} + \frac{V^{0,333}}{6V_г^0} = \frac{4500 \cdot 0,03^3}{1 + 500 \cdot 0,03^3} + \frac{1920^{0,333}}{6 \cdot 3,95} = 10,56 \text{ кг/м}^2.$$

в) Рассчитать пожарную нагрузку приведённую к древесине, отнесенную к площади тепловоспринимающих поверхностей:

$$P_к = \frac{\sum P_i Q_{Hi}}{(6F_{пола} - \sum F_{инн}) \cdot Q_{H.др}} = \frac{10000 \cdot 13400}{(6 \cdot 480 - 9,6) \cdot 16500} = 2,82 \text{ кг/м}^2.$$

г) Сравнить  $P_k$  и  $P_{k,кр}$ :  
 $P_{k,кр} > P_k$ , т.е.  $10,56 > 2,82$ , значит в помещении будет пожар регулируемый пожарной нагрузкой (ПРН), тогда:

$$t_{max} = 224 \cdot P_k^{0,528} = 224 \cdot 2,82^{0,528} = 387 \text{ }^\circ\text{C}.$$

д) Рассчитать время достижения максимального значения температуры:

$$\tau = 32 - 8,1P_k^{3,2} \cdot e^{-0,92P_k} = 32 - 8,1 \cdot 2,82^{3,2} \cdot e^{-0,92 \cdot 2,82} = 15 \text{ мин.}$$

Следовательно, среднеобъемная температура к 25 минуте понизится.

е) Рассчитать температуру в помещении на 25 минуте с начала развития пожара:

$$\frac{t_{25} - t_0}{t_{max} - t_0} = 115,6 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^{4,75} \cdot e^{-4,75(\tau/\tau_{max})},$$

$$t_{25} = 115,6 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^{4,75 - 4,75(\tau/\tau_{max})} \cdot e \cdot (t_{max} - t_0) + t_0 = 115,6 \left( \frac{25}{15} \right)^{4,75} \cdot e^{-4,75 \left( \frac{25}{15} \right)} \cdot (387 - 25) + 25 = 204 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ:

Среднеобъемная температура в помещении на 25 мин с начала пожара равна  $204 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Температуру пожара можно определить другим способом. Для этого:

1. Построить план развития пожара и установить какие проёмы вскроются к данному моменту времени.

2. Найти общую площадь проёмов ( $F_{np}$ ), площадь приточной части ( $F_l$ ), учитывая, что она составляет  $\frac{1}{3} \sum F_{np}$ .

3. Определить коэффициент избытка воздуха ( $\alpha$ ).

4. Рассчитать интенсивность теплового потока, падающего на  $1 \text{ м}^2$  ограждающих конструкций ( $F_{огр}$ ).

5. Найти температуру пожара в помещении на заданный момент времени.

Изменение притока воздуха в помещении происходит в момент вскрытия оконных и дверных проёмов.

Для того, чтобы оценить изменение среднеобъемной температуры в помещении, необходимо определить плотность теплового потока на данный момент времени:

$$q_\tau = \frac{Q_n}{F_{огр}} = \frac{\beta \cdot v'_m \cdot F_n \cdot Q_H}{F_{пола} + F_{потолка} + F_{стен}},$$

где  $\beta$  - коэффициент неполного сгорания, равный 0,99;

$v'_m$  - приведенная массовая скорость выгорания,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;

$F_n$  - площадь пожара на заданный момент времени,  $\text{м}^2$ ;

$Q_H$  - низшая теплота сгорания,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

Приведенная массовая скорость выгорания ( $v'_m$ ) зависит от площади проёмов и рассчитываются из выражения:

$$v'_m = \varphi \cdot v'_{m.m.} = \frac{F_{np}}{F_n \cdot 0,16} \cdot v'_{m.m.},$$

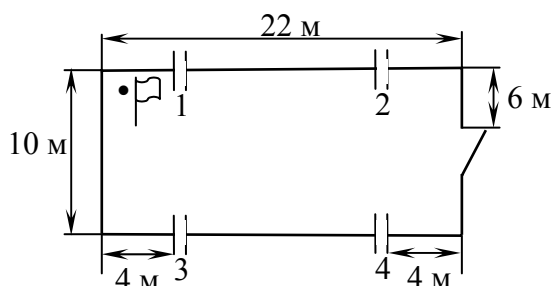
$v'_{m.m.}$  - значение табличной массовой скорости выгорания, кг/м<sup>2</sup>·с;

$\varphi$  - коэффициент, учитывающий условия газообмена.

### Задача 3:

Рассчитать температуру пожара на 18 минуте с его начала, если линейная скорость распространения пожара равна 1,2 м/мин, размеры оконных проёмов 1,5х1,5 м, дверных 0,9х2,1 м, предел огнестойкости дверей – 0,15 ч, высота помещения 4 м.

### Решение:



1. За 18 минут с начала пожара фронт пламени пройдёт расстояние равное

$$l_{18} = l_{10} + l_{(18-10)} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 10 + 1,2 \cdot 8 = 7,2 + 9,6 = 16,8 \text{ м.}$$

Площадь пожара при этом будет равна площади прямоугольника с размерами 10х16,8 м

$$F_{18} = 10 \cdot 16,8 = 168 \text{ м}^2.$$

2. Отношение площади приточной части проёмов к площади пожара будет равно

$$\frac{F_1}{F_n} = \frac{3}{168} = \frac{1}{56}, \text{ что меньше } \frac{1}{24}.$$

Отношение площади пожара к площади пола помещения будет равно

$$\frac{F_n}{F_{\text{пола}}} = \frac{168}{220} = 0,76, \text{ что меньше } 1.$$

3. По графику зависимости  $\alpha$  от  $V_e^o$  (приложение 1) находим, что  $\alpha = 2,0$ , т.к. отношение  $\frac{F_1}{F_n} = \frac{1}{37,3}$  ближе всего подходит к кривой 1  $\left(\frac{F_1}{F_n} = \frac{1}{24}\right)$ , а отношение  $\frac{F_n}{F_{\text{пола}}}$  ближе всего подходит к пунктирной кривой 1  $\left(\frac{1}{4} \leq \frac{F_n}{F_{\text{пола}}} \leq 1\right)$ , т.к. 0,76 больше  $\frac{1}{4}$ .

Значение  $\alpha$  находим на оси ординат для  $V_g^0 = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , т.к. пожарная нагрузка аналогична древесине.

4. Рассчитать интенсивность теплового потока, действующего на  $1 \text{ м}^2$  ограждающих конструкций:

$$q = \frac{\beta \cdot v_m' \cdot Q_M^p \cdot F_n}{F_{огр}}$$

где  $\beta$  – коэффициент недожога, равный 0,99;

$F_{огр}$  – площадь, ограждающих конструкций,  $\text{м}^2$ .

$$F_{огр} = F_{ст} + F_{пола} + F_{потолка} = 4 \cdot 10 \cdot 2 + 22 \cdot 4 \cdot 2 + 10 \cdot 22 + 10 \cdot 22 = 80 + 176 + 220 + 220 = 696 \text{ м}^2$$

$Q_H$  – низшая теплота сгорания древесины, равна 16500 кДж/кг;

$v_m'$  – приведенная массовая скорость выгорания, которая определяется исходя из графика зависимости массовой скорости выгорания от отношений  $\frac{F_{по}}{F_n}$  (приложение 2).

$$\text{На 18 минуте отношение } \frac{F_1}{F_n} = \frac{3}{168} = 0,053.$$

По этой кривой определяем, что

$$v_m' = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} = 0,007 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с};$$

$$q_{18} = \frac{0,99 \cdot 0,007 \cdot 16500 \cdot 168}{696} = 19,7 \text{ кВт/м}^2.$$

5. По номограмме (приложение 3) определим, что на 18 минуте после начала пожара температура пожара равна 420 °С.

Ответ:

$$t_{18} = 420 \text{ °С}.$$

## 5.6. Особенности газообмена на внутреннем пожаре

Большое влияние на тепловой режим пожара, скорость, направление и интенсивность развития оказывает газообмен.

Газообмен – это конвективные газовые потоки, которые образуются над зоной горения. Над любым источником тепла формируется тепловая струя. Газ (воздух), нагретый в зоне горения до высокой температуры, поднимается вверх, а взамен к очагу пожара подтекают новые порции более холодного воздуха.

На начальной стадии развития пожара горение происходит за счет воздуха, находящегося в объеме помещения. С окружающей (внешней) атмосферой газообмен отсутствует. Нагретые до высокой температуры продукты горения поднимаются вверх и вовлекают по пути своего движения примыкающие холодные массы воздуха. В результате обмена энергией тепловой струи (продуктов горения) с холодным воздухом скорость струи по мере удаления от очага уменьшается, охлажденный воздух (смесь его с

продуктами горения) вновь возвращается к очагу горения. Когда площадь пожара мала, тепловая струя затухает, не достигнув перекрытия. Зона горения является мощным побудителем движения воздушных масс в объеме помещения. По мере увеличения площади пожара мощность тепловой струи увеличивается, горячие газы с холодным воздухом частично растекаются под перекрытием, частично удаляются через проемы, а охлажденный воздух за счет теплопотерь опускается вдоль стен вниз, попадает в зону реакции, нагревается вновь и поднимается вверх. Таким образом, в помещении создается непрерывная циркуляция газовых потоков, температура в объеме помещения возрастает. В результате перепада температур между окружающим воздухом и горячим газом в объеме помещения возникает газообмен (из-за разных плотностей между горячим газом и холодным воздухом,  $\rho_g < \rho_v$ ). Кроме этого, т.к. объем нагретых газов больше, чем холодных, а давление в помещении останется постоянным, то часть газов за счет термического расширения будет вытесняться, т.е. масса газов ( $G = \rho V_{ном}$ ) в помещении будет уменьшаться по мере роста температуры. Взамен ушедшего газа поступает свежий воздух из окружающей атмосферы. Причиной газообмена является разность давления столбов наружного и внутреннего воздуха:

$$\Delta c = 3c_B - 3c_G = 3(c_B - c_G),$$

где  $\Delta p$  - гравитационное давление (напор).

### 5.7. Понятие нейтральной зоны и факторы, влияющие на её высоту

При рассмотрении основных закономерностей газообмена принимают ряд допущений:

- 1) Температура газов в помещении выше, чем температура окружающего воздуха, температура в помещении с течением времени не изменяется.
- 2) Ветровые нагрузки на здание отсутствуют.
- 3) Площади оконных и дверных проемов не изменяются.
- 4) Масса газов, втекающих в помещение, равна массе газов, удаляемых из помещения.

Так как температура в помещении больше температуры наружного воздуха, то и плотность воздуха больше плотности нагретых продуктов горения. Через нижний проем воздух будет входить в помещение и, т.к. он более плотный, то будет выталкивать через верхний проем горячий газ (смесь продуктов горения с воздухом).

Давление в нижней зоне помещения меньше, а в верхней больше, чем окружающей среды, этим обусловлено направление газовых потоков. Если условно весь объем помещения рассечь по высоте на плоскости, то найдется такая плоскость, где избыточное давление будет равно 0. Эта плоскость называется плоскостью равных давлений или нейтральной зоной (НЗ). Положение нейтральной зоны может меняться из-за изменения соотношения

между площадями нижних и верхних проемов. Этим приемом часто пользуются чтобы "поднять" нейтральную зону вверх с целью снижения задымленности и уменьшения температуры в нижней рабочей зоне при тушении пожаров.

Если увеличивать площадь верхних проемов и уменьшать площадь нижних, то высота нейтральной зоны увеличится.

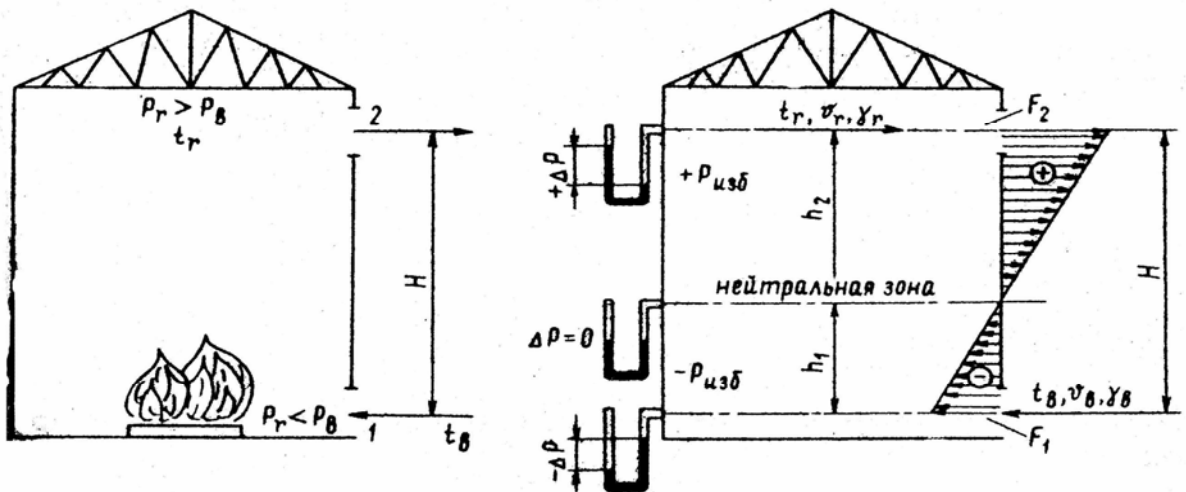


Рис. 19. Схема распределения статистического давления в помещении при пожаре

Для расчета положения нейтральной зоны определяют расстояние  $h_1$  и  $h_2$  от центров нижних и верхних проёмов до плоскости равных давлений (рис. 19). При этом абсолютные избыточные давления в центре нижних и верхних отверстий равны:

$$P_1 = h_1(\rho_{\theta} - \rho_r),$$

$$P_2 = h_2(\rho_{\theta} - \rho_r).$$

За счет избыточных давлений создаются скоростные напоры в отверстиях:

для нижнего:

$$P_1 = \frac{V_1^2 \rho_{\theta}}{2q}, \quad q = 9.8 \text{ м/с}^2 \text{ (ускорение свободного падения),}$$

для верхнего:

$$P_2 = \frac{V_2^2 \cdot \rho_r}{2q},$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – скорости потока газов в нижнем и верхнем отверстиях.

Преобразуем выражения:

$$\frac{V_1^2 \rho_{\theta}}{2q} = h_1(\rho_{\theta} - \rho_r) \quad \text{и} \quad \frac{V_2^2 \rho_r}{2q} = h_2(\rho_{\theta} - \rho_r),$$

получим

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \frac{\rho_{\theta}}{\rho_r}.$$



Так как объёмы входящего и выходящего газа различны из-за разницы плотностей, то расчет ведётся по массовым расходам, т.е. при установившемся режиме горения масса воздуха, втекающего в помещение через нижнее отверстие, равна массе горячего газа, уходящего через отверстие верхнее:

$$\begin{aligned} G_1 &= G_2, \\ G_1 &= \mu_1 f_1 V_1 \rho_6, \\ G_2 &= \mu_2 f_2 V_2 \rho_7, \end{aligned}$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициент расхода нижнего и верхнего отверстий;  
 $f_1$  и  $f_2$  – площади нижнего и верхнего отверстий.

Тогда

$$\mu_1 f_1 V_1 \rho_6 = \mu_2 f_2 V_2 \rho_7.$$

Следовательно,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\mu_2 f_2 \rho_7}{\mu_1 f_1 \rho_6},$$

подставив в выражение для  $\frac{h_1}{h_2}$  получим:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{\mu_2 f_2 \rho_7}{\mu_1 f_1 \rho_6} \right)^2 \cdot \frac{\rho_6}{\rho_7} = \left( \frac{\mu_2 f_2}{\mu_1 f_1} \right)^2 \cdot \frac{\rho_7}{\rho_6}.$$

Значения  $\mu_1$  и  $\mu_2$  находят в справочниках, а при допущениях, что отверстия одинаковой формы их берут равными  $\mu_1 = \mu_2$ , тогда:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \cdot \frac{\rho_7}{\rho_6}.$$

Значит, расстояние от плоскости равных давлений до центров нижних и верхних отверстий обратно пропорционально квадратам площади отверстий и плотностям удаляемого газа и воздуха.

Так как  $H = h_1 + h_2$ , можно найти  $h_1$  и  $h_2$ :

$$h_1 = \frac{H}{\left( \frac{f_1}{f_2} \right)^2 \frac{\rho_6}{\rho_7} + 1}; \quad h_2 = \frac{H}{\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{\rho_7}{\rho_6} + 1}.$$

Учитывая, что плотность газа обратно пропорциональна температуре, то

$$h_1 = \frac{H}{\left( \frac{f_1}{f_2} \right)^2 \frac{T_7}{T_6} + 1}; \quad h_2 = \frac{H}{\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{T_6}{T_7} + 1}.$$

Скорость воздуха и газа в отверстиях определяют по формуле:

$$V_1 = \sqrt{2qh_1 \frac{(p_6 - p_7)}{\rho_6}}; \quad V_2 = \sqrt{2qh_2 \frac{(p_6 - p_7)}{\rho_7}}.$$

Когда газообмен осуществляется через один дверной или оконный проем или через несколько проемов, расположенных на одном уровне, то через верхнюю часть удаляются продукты горения, а нижняя работает на приток. Положение нейтральной зоны относительно проема можно рассчитать по следующей формуле:

$$h_1 = \frac{H}{\sqrt[3]{\rho_e / \rho_\Gamma + 1}}; \quad h_2 = \frac{H}{\sqrt[3]{\rho_\Gamma / \rho_e + 1}},$$

где  $H$  – высота проема.

При установившемся горении массовый расход газа или воздуха можно рассчитать по уравнению:

$$G = \frac{2}{3} \mu \cdot \epsilon \sqrt{\frac{2qH^3(\rho_e - \rho_\Gamma)\rho_e \cdot \rho_\Gamma}{(\sqrt[3]{\rho_e} + \sqrt[3]{\rho_\Gamma})}},$$

где  $\epsilon$  – ширина проема.

Интенсивность газообмена ( $J_\Gamma$ , кг/с·м<sup>2</sup>) характеризуется отношением массы воздуха, поступающего в помещение в единицу времени через проемы к единице площади пожара:

$$J_\Gamma = \frac{G_\epsilon}{F_n} = \frac{v_\epsilon \cdot \epsilon (h_1 - H_n) \rho_e}{F_n}, \text{ где}$$

$v_\epsilon$  – линейная скорость движения воздуха в проеме;

$\epsilon$  – ширина проема;

$h_1$  – расстояние от пола по плоскости равных давлений;

$H_n$  – расстояние от пола до нижней кромки проема;

$\rho_e$  – плотность воздуха поступающего в помещения, кг/м<sup>3</sup>;

$F_n$  – площадь пожара.

По мере развития пожара положение нейтральной зоны меняется, если  $h_1 > H_\epsilon$ , т.е. нейтральная зона выше верхней кромки проема, тогда массовая скорость притока воздуха (расход) определяется:

$$G_B = \frac{2}{3} \mu F_{np} \sqrt{2qH_{np} \rho_e (\rho_e - \rho_\Gamma)},$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проема, принимают, равным 0.65.

Если нейтральная зона находится между кромками проема, тогда

$$G_\epsilon = \frac{2}{3} \mu F_1 \sqrt{2q(h_1 - H_n) \rho_e (\rho_e - \rho_\Gamma)},$$

где  $F_1 = \frac{1}{3} \sum F_{np}$  – площадь приточной части проёмов.

Если  $h_1 < H_n$ , то приток воздуха отсутствует,  $G_\epsilon = 0$ .

Массовый расход газов тоже зависит от расположения нейтральной зоны, если  $h_1 > H_\epsilon$ , то  $G_\epsilon = 0$ .

Если нейтральная зона расположена между кромками проёма, тогда

$$G_\epsilon = \frac{2}{3} \mu (F_{np} - F_1) \sqrt{2q(H_\epsilon - h_1) \rho_\Gamma (\rho_e - \rho_\Gamma)}.$$

Если  $h_1 < H_n$ , то

$$G_\epsilon = \frac{2}{3} \mu F_{np} \sqrt{2qH_{np} \rho_\epsilon (\rho_e - \rho_\epsilon)}.$$

Высоту нейтральной зоны можно определить по формуле:

$$h_1 = h - \frac{R(\rho_\Gamma T_n - \rho_e T_0)}{q(\rho_\Gamma - \rho_e) \cdot 1000},$$

где  $T_n$  – температура пожара, К;

$T_0$  – температура наружного воздуха, К;  
 $q$  – ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с;  
 $h$  – высота, равная половине высоты помещения;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 287 кДж/кг·К.

Таким образом, в условиях внутреннего пожара приток воздуха в зону горения и отток продуктов горения из помещения определяется геометрическими размерами здания, такими как высота помещения, соотношение площадей отверстий, соединяющих внутренний объем с окружающей средой и т.д.

При горении материалов выделяется дым, который различается по свойствам и составу не только в зависимости от вида горючего, но и от условий горения, главным образом, его интенсивности. В зависимости от условий воздухообмена дым на пожарах различается по прозрачности. Например, при сгорании 0,5 кг древесины в комнате площадью 12 м<sup>2</sup> и высотой 3 м видимость пропадает уже на расстоянии 0,5 м. Аналогичный результат достигается при сгорании в такой же комнате 0,3 кг керосина; 0,5 кг пенополиуретана; 0,1 кг пенорезины; 0,07 кг пенополистирола.

При отсутствии или ограничении вентиляции помещения дым, образующийся при пламенном горении, накапливается в припотолочной части. Толщина дыма со временем будет увеличиваться, создавая угрозу для людей. Скорость перемещения края дымового облака вдоль потолка составляет примерно 1 м/с. Время, в течение которого слой дыма опустится до отметки  $h$  (м) от пола, рассчитывается по формуле:

$$\tau = (20F_{пол} / \Pi\sqrt{g})(1/\sqrt{g} - 1/\sqrt{H}),$$

где  $F_{пол}$  – площадь пола, м<sup>2</sup>;

$H$  – высота до потолка, м;

$\Pi$  – периметр зоны горения, м;

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

Преобразовав это выражение можно получить высоту  $h$ , м:

$$h = 400 \cdot F_{пол}^2 / (\tau \cdot \Pi \cdot \sqrt{g} + 20 \cdot F_{пол} / \sqrt{H})^2.$$

Конвективный перенос горячими газами взвешенных твердых частиц из очага горения может вызвать их выпадение на удаленных участках и последующее возгорание материалов.

В припотолочном пространстве помещения в ходе пожара формируется слой горячего дыма и при достижении в нем температуры 500°С создаются условия для объемной вспышки. В результате этого в пожар вовлекается все способное к горению содержимое помещения.

### 5.8. Расчёт интенсивности газообмена

Интенсивность газообмена ( $J_{\Gamma}$ ) характеризуется отношением количества воздуха, поступившего в объём помещения через проёмы, к единице площади пожара за единицу времени:

$$J_{\Gamma} = \frac{G_t}{F_n}, \quad \varphi = \frac{J_{\Gamma, \text{т.р.}}}{J_{\Gamma, \text{ф.}}}$$

Требуемая интенсивность газообмена характеризуется отношением количества воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания пожарной нагрузки при заданной площади пожара:

$$J_{\Gamma, \text{т.р.}} = v_{\text{м.т.}}' \cdot V_{\text{г}}^0 \cdot \rho_{\text{г}}$$

где  $V_{\text{г}}^0$  - объём воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания 1 кг горючего вещества м<sup>3</sup>/кг;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха при данной температуре.

Фактическая интенсивность газообмена зависит от высоты нейтральной зоны, высоту которой рассчитывают из выражения:

$$h_{\text{н.з.}} = \frac{H_{\text{пр}}}{\left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{пр}}}\right)^{0,666}} + B,$$

где  $H_{\text{пр}}$  – высота проёма, м;

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

$\rho_{\text{пр}}$  – плотность продуктов горения при соответствующей температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$B$  – расстояние от пола до подоконника, м.

Если  $h_{\text{н.з.}} > H_{\text{в}}$ , т.е. высота нейтральной зоны выше верхней кромки проёма ( $H_{\text{в}}$ ), то фактическая интенсивность газообмена определяется из выражения:

$$J_{\Gamma, \text{ф.}} = \frac{2}{3} \mu \frac{F_{\text{пр}}}{F_n} \sqrt{2qH_{\text{пр}} \rho_{\text{г}} (\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{пр}})},$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проёма, принимается равным 0,65;

$q$  - ускорение свободного падения, равное 9,8 м<sup>3</sup>/с.

Если  $h_{\text{н.з.}}$  находится между верхней ( $H_{\text{в}}$ ) и нижней ( $H_{\text{н}}$ ) кромками проёма, то  $J_{\Gamma, \text{ф.}}$  рассчитывается из выражения:

$$J_{\Gamma, \text{ф.}} = \frac{2}{3} \mu \frac{F_1}{F_n} \sqrt{2q(h_{\text{н.з.}} - H_{\text{н}}) \rho_{\text{г}} (\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{пр}})},$$

где  $F_1$  - площадь приточной части проёмов, равная  $F_1 = \frac{1}{3} \sum F_{\text{пр}}$ .

Если  $h_{\text{н.з.}}$  располагается ниже нижней кромки проёма, т.е.  $h_{\text{н.з.}} < H_{\text{н}}$ , то приток воздуха отсутствует, т.е. газообмена не происходит.

При известной температуре пожара высоту нейтральной зоны можно определить:

$$h_{н.з.} = h - \frac{R(\rho_{III}T_{II} - \rho_6T_0)}{q(\rho_{III} - \rho_6) \cdot 1000},$$

где  $R$  - универсальная газовая постоянная, кДж/кг · К;

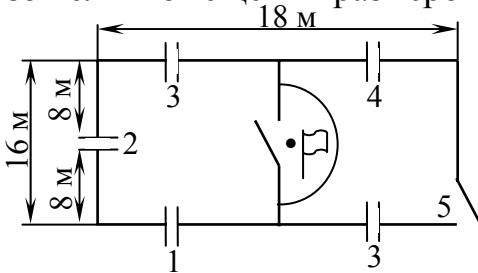
$T_0$  - начальная температура в помещении, К;

$h$  - половина высоты помещения, м.

Из этого же выражения можно определить температуру пожара, зная высоту нейтральной зоны.

#### Задача 1:

Рассчитать интенсивность газообмена и среднеобъемную температуру в помещении, если пожарная нагрузка аналогична древесине, пожар произошел в помещении размером 16x18x4 м.



Размеры окон 1,3x1,3 м, двери наружной 0,9x2,2 м, двери внутренней 0,9x2,0 м, предел огнестойкости дверей – 0,25 ч, скорость распространения пламени равна 0,8 м/мин, массовая скорость выгорания древесины – 0,014 кг/м<sup>2</sup>·с. Определить среднеобъемную температуру в помещении на момент времени 7, 12, 32 минут. Пожар возник у двери в смежное помещение.

#### Решение:

1. Определить расстояние, пройденное фронтом пламени на 7 минуте:

$$\ell_7 = \frac{1}{2} v_n \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 7 = 2,8 \text{ м},$$

$$F_7 = \frac{1}{2} \pi \ell_7^2 = \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 2,8^2 = 12,3 \text{ м}^2.$$

Время вскрытия двери:

$$0,25 \cdot 60 = 15 \text{ минут}.$$

На 7 минуте с начала пожара ещё ни один проём не вскрылся.

2. Рассчитать отношение  $F_n / F_{пола}$ :

$$\frac{F_n}{F_{пола}} = \frac{12,3}{160} = \frac{1}{13}.$$

На графике зависимости  $\alpha$  от  $V_e^0$  выбираем пунктирную кривую, т.к.

$$\frac{F_n}{F_{пола}} < \frac{1}{4}, \text{ номер кривой } - 1, \text{ т.к. } F_1 = \frac{1}{3} F_{np} = 0, \text{ значит } \frac{F_1}{F_n} < \frac{1}{24}.$$

1. По графику определяем коэффициент избытка воздуха в зависимости от  $V_e^0$ :  $\alpha = 2,2$ .

4. Рассчитать массовую скорость выгорания древесины на данный момент времени:

$$v_m' = v_{м.табл}' = 0,014 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}.$$

5. Рассчитать интенсивность теплового потока, приходящегося на  $1 \text{ м}^2$  ограждающих конструкций:

$$q = \frac{\beta \cdot v_m' \cdot F_n \cdot Q_H \cdot \alpha}{F_{\text{опр}}} = \frac{0,99 \cdot 0,014 \cdot 12,3 \cdot 2,2 \cdot 16500}{528} = 11,7 \text{ кВт/м}^2.$$

6. По графику определить  $t_n - t_H$  в зависимости от  $q$ :

$$t_n - t_H = 110 \text{ }^\circ\text{С}.$$

7. Определить площадь пожара на 12 минуте:

$$\ell_{12} = 0,5v_{\text{л}} \cdot \tau + v_{\text{л}} \cdot (\tau - 10) = 5,6 \text{ м},$$

$$F_n = 1/2\pi\ell_{12}^2 = 49,2 \text{ м}^2.$$

До ограждающих конструкций осталось 2,4 м, пламя пройдёт их за время

$$\tau = \frac{2,4}{0,8} = 3 \text{ мин}$$

и на 15 минуте фронт пламени спрямится и примет форму прямоугольника со сторонами  $10 \times 8 \text{ м}$ . Вскроются 2 оконных проёма, площадь которых равна:

$$\sum F_{\text{пр}} = 1,3 \cdot 1,3 \cdot 2 = 3,38 \text{ м}^2;$$

$$\frac{1}{3} \sum F_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \cdot 3,38 = 1,13 \text{ м}^2 - \text{будет работать на приток}$$

воздуха;

$$F_n = 80 \text{ м}^2;$$

$$\frac{F_1}{F_n} = \frac{1,13}{80} = \frac{1}{70,8} < \frac{1}{24}, \text{ следовательно, кривая 1;}$$

$$\frac{F_n}{F_{\text{пола}}} = \frac{80}{160} = \frac{1}{2} > \frac{1}{4}, \text{ но меньше 1, следовательно, это}$$

сплошная кривая,  $\alpha = 1,8$ .

9. Интенсивность теплового потока на 15 минуте равна:

$$v_m' = \frac{F_{\text{пр}}}{F_n \cdot 0,16} \cdot v_{\text{мабл}}' = \frac{3,38}{80 \cdot 0,16} \cdot 0,014 = 0,004 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с};$$

$$q_{15} = \frac{\beta \cdot \alpha \cdot v' \cdot Q_H \cdot F_n}{F_{\text{опр}}} = \frac{0,99 \cdot 1,8 \cdot 0,004}{528} \cdot 16500 \cdot 80 = 17,82 \text{ кВт/м}^2.$$

Температура пожара равна:

$$t_n - t_H = 400 \text{ }^\circ\text{С}.$$

10. На момент времени 12 мин

$$q = \frac{\beta \cdot \alpha \cdot v_m' \cdot F_n}{F_{\text{опр}}} = \frac{0,99 \cdot 1,8 \cdot 0,014 \cdot 49,2 \cdot 16500}{528} = 38,4 \text{ кВт/м}^2,$$

$$t_n - t_H = 530 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Следовательно, на 15 минуте в результате вскрытия проёмов температура снизилась.

11. Рассчитать высоту нейтральной зоны:

$$h_{H.3.} = \frac{H_{np}}{\sqrt{\frac{\rho_6}{\rho_{III}} + 1}} + \epsilon;$$

$$\rho_6 = \frac{\mu}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t)} = \frac{29}{22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,2 \text{ кг/м}^2;$$

$$\rho_{III} = \frac{30}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 400)} = 0,542 \text{ кг/м}^3;$$

$$h_{H.3.} = \frac{1,3}{\sqrt[3]{\frac{1,21}{0,542} + 1}} + 0,7 = 1,3 \text{ м.}$$

12. Рассчитать интенсивность газообмена на момент времени 15 минут:

$$\begin{aligned} J_z &= \frac{2}{3} \mu \frac{F_1}{F_n} \sqrt{2q(h_{H.3.} - H_H) \rho_6 (\rho_6 - \rho_z)} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot \frac{1,3}{80} \sqrt{29 \cdot (1,3 - 0,7) \cdot 1,21 \cdot (1,21 - 0,542)} = 0,022 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} \end{aligned}$$

;

$$J_{z.треб} = \alpha \cdot v_m' \cdot V_6^0 \cdot \rho_6 = 1,8 \cdot 0,004 \cdot 4,2 \cdot 1,21 = 0,036 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с},$$

т.е. для обеспечения полноты сгорания требуется больше воздуха, чем поступает в помещение.

13. Рассчитать площадь пожара на момент 32 минуты:

Следует учесть, что с 15 минуты пламя перешло в правое помещение

$$\ell_{32} = 0,5v_{л} \cdot \tau + v_{л}(\tau - 10) = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 10 + 0,8 \cdot 22 = 21,8 \text{ м},$$

т.е. всё левое помещение будет охвачено огнём и будут вскрыты все три оконных проёма.

$$\sum F_{np} = 1,3 \cdot 1,3 \cdot 3 = 5,1 \text{ м}^2;$$

$$\frac{1}{3} \sum F_{np} = 1,69 \text{ м}^2 = F_1.$$

Кроме того, пламя будет распространяться во втором помещении:

$$32 - 15 = 17 \text{ мин},$$

$$\ell_{32} = v_{л}(17 - 10) = 0,8 \cdot 7 = 5,6 \text{ м.}$$

Пожар будет иметь форму полукруга:

$$F_{32} = \frac{1}{2} \pi \ell^2 = \frac{1}{2} \pi \ell^2 = \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 5,6^2 = 49,2 \text{ м}^2;$$

$$F_{II} = 49,2 + 160 = 209,2 \text{ м}^2;$$

$$\frac{F_1}{F_n} = \frac{1,69}{209,2} = \frac{1}{24} \text{ — кривая 1};$$

$$\frac{F_n}{F_{пола}} = \frac{209,2}{288} = \frac{1}{3,8}, \text{ т.е. пунктирная, } \alpha = 2,2;$$

$$q_{32} = \frac{\beta \cdot v_m' \cdot F_n \cdot Q_H}{F_{озр}};$$

$$v_m' = \frac{F_{np}}{F_n \cdot 0,16} \cdot v_{табл} = \frac{1,69}{209,2 \cdot 0,16} \cdot 0,014 = 0,001 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с};$$

$$q = \frac{0,99 \cdot 0,001 \cdot 209 \cdot 16500}{528 + 450} = 3,49 \text{ кВт/м}^2;$$

$$t_n - t_H = 200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

13. Рассчитать интенсивность газообмена на 32 минуте:

$$h_{H.3.} = \frac{H_{np}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_6}{\rho_2} + 1}} + e;$$

$$\rho_6 = 1,21 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_2 = \frac{30}{V_0(1 + 0,00367 \cdot 200)} = \frac{30}{38,8} = 0,77 \text{ кг/м}^3;$$

$$h_{H.3.} = \frac{1,3}{\sqrt[3]{\frac{1,21}{0,77} + 1}} + 0,7 = 1,3.$$

Так как  $H_H < h_{H.3.} < H_6$ , тогда

$$J_z = \frac{2}{3} \mu \cdot \frac{1,69}{209} \sqrt{2 \cdot 9,8(1,3 - 0,7) \cdot 1,21(1,21 - 0,77)} = 0,009 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Ответ: Среднеобъёмная температура на 7, 12, 32 минутах равна 110 °С, 530 °С, 200 °С соответственно;  $J_{z15} = 0,022 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $J_{z32} = 0,009 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ .



## Глава 6 ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГОРЕНИИ

### 6.1. Пределы в горении

Пределные явления в горении – это те условия и параметры, за пределами которых процессы горения возникнуть или существовать не могут. Прежде всего, это концентрационные пределы воспламенения и распространения пламени; температурные пределы воспламенения жидкости, твердых веществ и материалов; пределы по давлению; мощности источника зажигания; предельные скорости распространения пламени; предельные значения массовой скорости выгорания; пределы по температуре в зоне горения и т.д. Ниже предельных значений этих параметров процессы горения существовать не могут. В одном случае они просто не возникают, а в другом, если горение существовало, то оно прекращается.

Наибольший интерес представляют те параметры, на которые можно воздействовать и которыми можно управлять. К таким параметрам относятся:

#### 1) Концентрационные пределы

Вне этих пределов горение невозможно. На границах этих пределов минимальная энергия зажигания резко возрастает, и воспламенение становится невозможным (рис. 20). Если горение уже возникло и в это время снижать концентрацию горючей смеси до  $C_H$  и ниже, то в этом случае энергии, которая поступает от пламени к смеси, становится недостаточно для того, чтобы поддерживалось непрерывное воспламенение новых порций холодной смеси, и горение прекращается. Такой механизм прекращения горения называется прекращением горения на концентрационных пределах. В этом случае доля потерь тепла, поступающего от фронта пламени, растет, и температура в зоне горения будет снижаться.

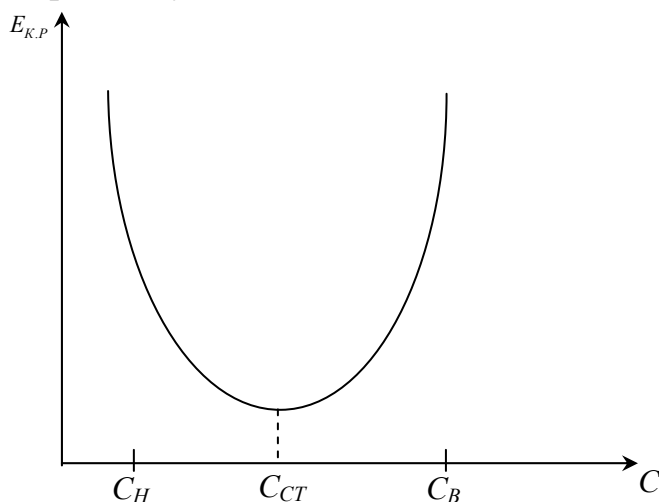


Рис. 20. Зависимость мощности источника зажигания от концентрации горючего

Концентрационные пределы распространения пламени по газо-, паровоздушным смесям, как правило, совпадают с концентрационными пределами воспламенения. Вне этих пределов пламя не распространяется, т.е. затухает, но иногда концентрационные пределы распространения пламени могут не совпадать с концентрационными пределами воспламенения. Если источник зажигания находится внизу и пламя будет распространяться снизу вверх, тогда концентрационные пределы совпадут. При расположении источника зажигания в верхней части горючей смеси и распространении пламени сверху вниз, то концентрационные пределы распространения пламени будут уже пределов воспламенения, т.е. смесь будет воспламеняться, но пламя распространяться не будет вообще либо будет распространяться только в горизонтальном направлении, после чего пламя погаснет, не распространяясь на близлежащие участки холодной смеси. Это связано с тем, что часть тепла теряется за счет конвективных тепловых потоков, которые направляются вверх, т.е. тепло уносится с продуктами горения.

К концентрационным пределам относят предельные концентрации нейтральных разбавителей (или инертных газов), которые добавляют в горючие смеси для флегматизации. Численные значения зависят от вида флегматизатора, горючего, режима горения, давления.

Для  $\text{CO}_2$  они составляют ~25-30 %;

$\text{H}_2\text{O}$  – 30-35 %;

$\text{N}_2$  – 35-40 %;

$\text{Az}$  – 50-55 %.

Если в смеси флегматизаторов будет больше предельного значения, то смесь будет негорючей и невоспламеняемой. К концентрационным пределам относят пределы по кислороду,  $\approx 10-15$  %. При концентрации  $\text{O}_2$  ниже этого предела горение невозможно.

#### 2) Предельные энергии зажигания

Критическое значение энергии электрической искры, которая безопасна для водородо-воздушной смеси стехиометрического состава равна 0.01 мДж, а для углеводородо-воздушных смесей  $\approx 0.1$  мДж. Если в смеси снижать давление, то критическая энергия зажигания будет возрастать ( $\approx$  в 10 раз), например, до 5 мДж при давлении в 0.2 атм. А если в составе смеси азот заменить кислородом, то критическая энергия зажигания будет снижаться ( $\approx 0.002$  мДж), что увеличивает пожаровзрывоопасность смеси.

Если мощность источника зажигания будет ниже критической, то воспламенения не произойдет.

#### 3) Пределы по давлению

Для водородо-воздушных смесей стехиометрического состава предел по давлению составляет  $\approx 0.01$  атм. При меньшем давлении воспламенение практически невозможно. Для углеводородо-воздушных смесей предел по давлению  $\approx 0.1$  атм.

#### 4) Предельные скорости распространения горения

Верхние пределы для газов практически не определены. Для газоздушных смесей их не существует, т.к. они могут изменяться от 0.4 до 2.5 м/с для нормального ламинарного пламени, потом могут достигнуть 100 м/с, затем могут перейти в турбулентные пламена со скоростью до  $\approx 300-400$  м/с, после этого могут перейти в режим детонационного горения со скоростью  $\approx 2-3$  км/с. Нижнее значение скорости распространения пламени по газоздушным смесям ограничено  $\approx 0.02-0.04$  м/с. Скорость распространения пламени по поверхности жидкостей и твердых веществ еще меньше. Нижнее значение может быть близко к нулю (если пламя не распространяется), а верхнее  $\approx 10 - 15$  м/с.

Массовая скорость выгорания твердых веществ и материалов зависит от вида горючего и условий горения. Верхний предел ограничен величиной  $0.015 \div 0.02$  кг/м<sup>2</sup>·с. Нижние пределы почти одинаковы для жидкостей и твердых веществ и равны  $\approx 0.003-0.005$  кг/м<sup>2</sup>·с. При меньших скоростях выгорания процесс горения становится невозможным и горение прекращается.

#### 5) Пределы по теплоте сгорания

Большой интерес представляет нижнее предельное значение по теплоте сгорания. Нижний предел по теплоте горения равен  $\approx 1830$  кДж/м<sup>3</sup>. При меньшей теплоте сгорания самопроизвольное распространение горения невозможно. По нижнему пределу по теплоте сгорания можно рассчитать предельное значение температуры горения.

#### б) Предел по температуре горения

Теоретически температура горения составляет  $\approx 2500-3000$  К. В натуральных условиях температура редко превышает 1700-1800 К. Верхние пределы по температуре горения для газов составляют 1600-1800 К, для жидкостей – 1500-1600 К, горючих твердых веществ – 1400-1500 К. Если принять во внимание, что нижний предел по теплоте сгорания равен  $\approx 1830$  кДж/м<sup>3</sup>, а потери тепла из зоны горения составляют 20 %  $Q_{II}$ , то в зоне горения остается  $\approx 1460$  кДж/м<sup>3</sup>. Учитывая, что среднее значение удельной теплоемкости продуктов горения  $C_p \approx 1.45$  кДж/м<sup>3</sup>·°С при изменении температуры от 100 до 1000 °С, тогда

$$T_n \approx \frac{Q_{Прег} - \Delta Q_{пот}}{C_p} \approx \frac{1460}{1.45} \approx 1000 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура пожара, равная 1000 °С, называется температурой потухания.

Ниже этой температуры пламенное горение становится невозможным. Пламя потухает и горение прекращается.

## 6.2. Тепловая теория потухания

Советские ученые Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.Л., Блинов В.И. вывели в своих исследованиях, что *если в зоне протекания химических реакций горения снизить температуру до 1000 °С любым способом, то*

*процесс самопроизвольного горения станет невозможным и горение прекратится.*

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 результате будет снижаться скорость протекания химической реакции, поэтому снизится интенсивность тепловыделения, а значит, температура в зоне горения. Можно увеличить интенсивность теплоотвода из зоны горения. Для этого можно вводить вещества, обладающие большой теплоемкостью, или вещества, которые претерпевают фазовые превращения, которые сопровождаются поглощением тепла.

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.

### **6.3. Способы предотвращения и прекращения горения**

Наиболее эффективны способы, основанные на использовании предельных явлений и параметров:

1) Обеспечение определенного концентрационного состава газопаровоздушных смесей. Это достигается либо соблюдением определенных температурных пределов каждого конкретного вида производства (т.е. соблюдение безопасных температурных пределов), или обеспечением регламентных условий по давлению, или по расходу горючих компонентов в аппаратах. Если соблюдение этих условий невозможно, то поддерживают необходимую концентрацию нейтральных газов или ингибиторов. Их концентрация должна быть постоянно выше предельного значения.

2) Другой способ предотвращения горения заключается в ограничении потенциальных источников зажигания по критическим энергиям зажигания, температуре самовоспламенения и вынужденного воспламенения.

в) Широко используются предельные значения параметров распространения горения. В том числе такая величина как критический гасящий диаметр или критический размер гасящей щели. Суть в том, что существуют предельно-малые размеры зазоров, отверстий, каналов, через которые горение уже не распространяется. Механизм гашения пламени в узких щелях основан на том, что фронт пламени, разбиваясь на маленькие струйки, проходит через каналы, отдавая тепло. Размер критического диаметра рассчитывается по формуле:

$$d_{кр} = \frac{60RT_{пл} \lambda_{ГС}}{U_H C_{р. см} P_{см}},$$

где  $U_H$  – нормальная скорость распространения пламени;

$R$  – газовая постоянная;

$\lambda_{см}, C_{р. см}$  – удельные теплопроводность и теплоемкость смеси;

$T_{пл}$  – температура пламени, К;

$P_{см}$  – давление смеси, кПа.

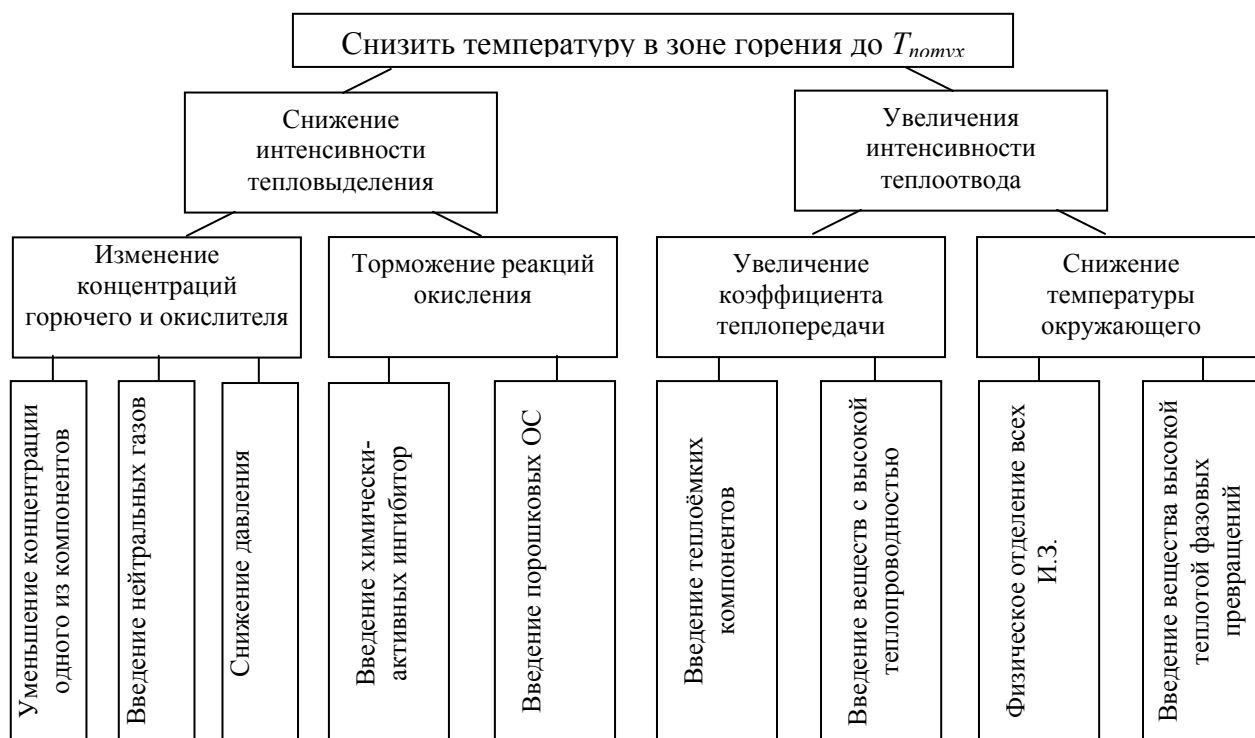
Расчет и конструирование таких предохранительных систем, как быстродействующие пламяотсекатели, разгрузочные взрывные мембраны, клапана, легкобрасываемые конструкции основаны на понятии предельных явлений, таких как предельные значения скорости распространения пламени, давления взрыва, критические гасящие диаметры.

Такие расчеты, как предел огнестойкости конструкций, время эвакуации людей, противопожарных разрывов основаны на предельных параметрах, таких как теплота сгорания, температура пожара, скорость распространения пожара.

На использовании предельных параметров процессов горения основаны практически все приемы и способы прекращения горения при тушении пожаров.

Простейшим способом тушения пожаров на газопроводе или любом другом трубопроводе с горючим газом или жидкостью является снижение интенсивности подачи и полное прекращение поступления горючего вещества путем закрытия вентиля, задвижками или другими устройствами. Горение прекратится, так как концентрация горючего станет ниже  $C_H$ . Можно снизить концентрацию горючего до  $C_H$ , если интенсивно подавать воздух. Горение также в этом случае может прекратиться за счет аэродинамического срыва пламени. Это произойдет, если скорость воздушного потока будет больше скорости распространения пламени. Таким образом можно тушить пожар на самолете, если он возник на внешних элементах конструкции или, если пожар возник на стоящем на земле самолете, при подаче мощной струи воздуха из сопла реактивного двигателя. Хотя на практике такой способ редко применяется.

Из всего сказанного можно сделать выводы: прекратить процесс горения – это значит:



Следовательно, для того, чтобы потушить пожар, необходимо создать в зоне горения такие физико-химические условия, при которых горение становится невозможным.

## Глава 7 ПРЕКРАЩЕНИЕ ГОРЕНИЯ НА ПОЖАРАХ

### 7.1. Механизмы прекращения горения

Тушение пожара достигается различными путями и средствами.

Потушить пожар с физической точки зрения – это значит прекратить процесс горения во всех видах, т.е. надо создать в зоне горения условия, исключающие возможность продолжения процесса горения в любой форме. Если рассмотреть "классический треугольник пожара", тогда видно, что если оборвать одну из связей в треугольнике, то горение станет невозможным. Т.е., если прекратить поступление горючего в зону горения (закрыть задвижки), то горение прекратится, или накрыть очаг изолирующим материалом (раствор пены) и т.д., или разборка горящих конструкций – это тоже исключение горючего материала из процесса горения.

Если закрыть, например, подвал, то прекратится доступ кислорода. Но в этом случае прекратится только пламенное горение, а беспламенное будет продолжаться при 5-6 %  $O_2$ . Метод изоляции источника зажигания применяется, например, при тушении диффузионного пламени газовой горелки. Накрывают в мертвой зоне между газовой горелкой и струей пространство теплоемкой металлической сеткой и затем ее поднимают вверх до полного отрыва пламени от устья.

Иногда производят взрыв взрывчатых веществ в мертвой зоне, при этом факел пламени отрывается от свежей смеси, горение прекращается.

Частым способом прекращения горения жидкостей является перемешивание. При этом на поверхность жидкости поступают холодные массы жидкости, а верхние нагретые слои размешаны и охлаждены, тогда на поверхности создается холодный слой с температурой ниже температуры воспламенения и даже температуры вспышки, поэтому в зону горения поступать горючие пары перестают и горение прекращается.

В принципе возможно тушение, если горючую смесь переобогатить горючим газом или паром, но в связи с тем, что на пожарах доступ кислорода в зону горения велик и труднорегулируем, то подача горючего может, наоборот, привести к интенсификации процесса горения.

Механизм прекращения горения на пожаре связан и зависит от режима горения, окружающих условий, состояния горючего и т.д.

От того, какой механизм прекращения горения предполагается и зависит выбор огнетушащих средств, способ их подачи, интенсивность подачи.

Под огнетушащими средствами понимают различные вещества и материалы, с помощью которых можно создавать условия для прекращения горения.

Все огнетушащие средства делятся по агрегатному состоянию и по механизму прекращения горения.

По агрегатному состоянию они делятся на:

- а) жидкие (вода, водные растворы);
- б) пенные (воздушно-механические и химические пены);
- в) порошковые;
- г) сыпучие (песок, земля и т.д.);
- д) аэрозольные.

По механизму прекращения горения они делятся на:

- а) охлаждающие;
- б) разбавляющие;
- в) химически тормозящие реакцию окисления;
- г) изолирующие.

Охлаждение зоны горения происходит всегда, т.е. при любом механизме прекращения горения, а охлаждение горючих веществ целесообразно только в тех случаях, когда снижение их температуры может привести к прекращению горения, а это зависит от агрегатного состояния вещества.

При выборе механизма прекращения горения важную роль играет исходное состояние горючего вещества и режим горения. Однозначно относить то или иное огнетушащее средство к определённой группе по механизму прекращения горения без учёта конкретных условий нельзя. Основным механизмом прекращения горения одного и того же ОС может изменяться. В то же время у различных ОС может быть один и тот же механизм прекращения горения.

Почти все огнетушащие средства, попадая в зону горения, действуют комплексно, одновременно по 2-3 механизмам. Они охлаждают горючие материалы и одновременно зону горения, разбавляют реагирующие компоненты и снижают тепловыделение и т.д. Но для каждого огнетушащего средства существуют 1-2 основных механизма, которые являются доминирующими, по сравнению с сопутствующими.

Например, при горении перемешанных горючих смесей в замкнутом объеме, т.е. при кинетическом горении, невозможен механизм изоляции. Фронт пламени при таком режиме горения движется по горючей смеси самопроизвольно и остановить его можно внешним воздействием: химическим торможением реакции горения во фронте пламени (для этого вводятся химически активные ингибиторы) или отводом тепла (для этого используются огнепреградители). Если же образовавшееся пламя стационарно, т.е. сидит на устье трубопровода, то можно прекратить горение, изменяя состав смеси (перекрыть задвижки или введением нейтральных газов в состав смеси) или динамическим срывом пламени.

Если горение диффузионное, то существует больше возможностей для прекращения горения: изоляция компонентов друг от друга; введение огнетушащего средства в один из компонентов смеси; снижение интенсивности поступления одного из компонентов, а также охлаждение зоны горения.



Если происходит диффузионное горение факела пламени на устье газового или нефтяного фонтана и невозможно прекратить поступление горючего или изменить его состав, тогда единственная возможность – это воздействие на факел пламени.

Способы воздействия:

1) Взрыв взрывчатого вещества в устье.

2) Введение в факел компонентов охлаждающих его: вода, порошковые составы.

3) Интенсивное введение нейтральных газов или химически активных ингибиторов.

При горении на фонтанах охлаждение горящего вещества практически бессмысленно, так как горючие газы способны гореть при любой температуре, а горючие жидкости в условиях фонтана распределяются так интенсивно, что охладить их ниже температуры вспышки практически невозможно, т.е. охлаждать надо сам факел, отводить тепло непосредственно из зоны горения. Это технически можно сделать, т.к. факел имеет форму конуса с вершиной внизу и с основанием сверху, область зажигающего кольца находится в вершине конуса, т.е. в нижней части, достаточно прекратить горение на непродолжительное время в области зажигающего кольца и горение прекратится. При тушении протяженность зоны зажигающего кольца сужается, его мощность уменьшается, факел пламени перемещается вверх, и как только его мощность достигнет критического значения, факел оторвется и горение прекратится. Это в том случае, если нет других источников зажигания: раскаленных конструкций, электрических искр, разрядов статического электричества.

Охлаждение факела пламени и горящего материала будет тем полнее, чем больше поверхность и время контакта охлаждающего вещества с газовой средой или с горючим материалом. Поэтому воду надо подавать в факеле или на горящую поверхность равномерно, т.е. подавать распылённую струю и непрерывно. При тушении мощных газовых фонтанов распылённые струи эффективнее, чем компактные, но следует иметь в виду, что ручным способом подать тонкораспылённую струю в факеле невозможно без специальных средств защиты.

Степень дисперсности капель воды и скорость полёта должны быть максимальны, чтобы могли достигнуть факела. В противном случае, тонкораспыленная вода будет уноситься конвективными потоками.

При пожарах в резервуарах факел имеет другую форму – пламя представляет из себя конус в нормальном положении с вершиной сверху и основанием внизу. Высота конуса может достигать 1.5-2 диаметра основания. Периметр основания равен периметру резервуара и может достигать нескольких десятков метров. Конвективные потоки вокруг основания факела менее значительны, чем в верхней части. Поток паров обладает малой кинетической энергией и поднимается вверх по законам физики или за счет конвективных потоков. Интенсивность этих потоков во много раз меньше,

чем в устье скважин. Поэтому огнетушащие средства необходимо подавать в зону горения от основания до вершины факела пламени, чтобы горение прекратилось одновременно во всем объеме. Но осуществить подачу ОС по всему периметру основания очень сложно, поэтому такой способ практически не применяют. Такие пожары как, правило, тушат либо охлаждением ЛВЖ или ГЖ, либо изоляцией горючей жидкости от зоны горения путем подачи пены или порошка.

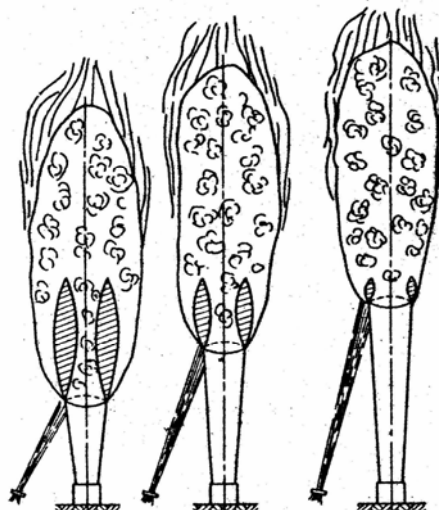


Рис. 21. Механизмы прекращения горения газового фонтана

При тушении пожаров, связанных с твердыми веществами, охлаждение факела – второстепенная задача, т.к. охлаждение зоны горения и даже полное прекращение пламенного горения еще не означает, что пожар потушен. Потому что, ТГМ склонны кроме гомогенного горения еще и к гетерогенному. Температура на поверхности твердых материалов, зачастую, выше температуры самовоспламенения продуктов их пиролиза и может быть выше температуры их вынужденного зажигания и равна 800-900 °С. И в поверхностных слоях при этом происходит процесс тления. Поэтому после прекращения пламенного горения через некоторое время может опять возникнуть фронт пламени, и этот процесс может происходить многократно, пока температура на поверхности не станет ниже температуры самовоспламенения, при этом снизится выход летучих продуктов разложения.

При тушении, например, штабелей древесины необходимо воздействовать огнетушащим веществом на все поверхности, с которых могут выделяться летучие продукты разложения.

Таким образом, механизм прекращения горения того или иного вещества зависит от вида горючего материала и от его агрегатного состояния, а это определяет способ тушения пожара, вид огнетушащего вещества, способ его подачи (рис. 21).

Так, для тушения газовых и газонефтяных фонтанов могут применяться все виды огнетушащих веществ: нейтральные газы, ингибиторы, порошки, вода, комбинированные средства тушения, кроме изолирующих средств.

При горении жидкостей можно использовать все без исключения средства, но если пожар в резервуаре на открытой местности, то нецелесообразно применение нейтральных газов и ингибиторов, т.е. средств объемного тушения, которые действуют на факел, а также распыленная вода в этом случае неэффективна. Более эффективно применение изолирующих средств типа пен, порошков, которые действуют по поверхности горящей жидкости, а также охлаждающих средств, которые охлаждают поверхность жидкости, а вот при внутренних пожарах эффективны средства объемного тушения: нейтральные газы, ингибиторы и порошки.

При тушении ТГМ наиболее эффективны охлаждающие средства: вода, вода со смачивателем, которые действуют по принципу охлаждения горючих материалов, и изолирующие огнетушащие вещества типа пен и порошков. Но при тушении ТГМ неэффективны нейтральные газы, ингибиторы, порошки, которые в основном действуют на факел пламени.

Наиболее широко применяются охлаждающие и изолирующие огнетушащие средства. И то и другое достигается методом их подачи на поверхность горючего материала. В качестве таких средств применяют жидкие, коллоидные, дисперсные системы, сыпучие вещества, а в качестве горючего материала выступают твердые и жидкие вещества.

### ***Нормативные параметры пожаротушения***

Нормативными параметрами пожаротушения являются: время тушения, интенсивность подачи средства тушения и удельное количество средства, обеспечивающее прекращение горения. Они связаны следующей зависимостью:

$$q = J \cdot \tau,$$

где  $q$  – удельное количество средства тушения, необходимое для прекращения горения, кг/м<sup>2</sup> (при поверхностном тушении) и кг/м<sup>3</sup> (при объёмном тушении и флегматизации);

$J$  – интенсивность подачи, кг/м<sup>2</sup>·с при поверхностном тушении и кг/м<sup>3</sup>·с при объёмном тушении;

$\tau$  – время подачи ОС, с, мин.

## **7.2. Негорючие газы и химически-активные ингибиторы**

### ***7.2.1. Механизм прекращения горения негорючими газами***

В качестве инертных разбавителей (негорючих газов (НГ)) чаще всего применяют азот, углекислый газ, водяной пар, реже гелий и аргон.

Попадая в зону реакции, эти вещества снижают концентрацию горючего и окислителя, а значит, скорость химической реакции между ними, скорость тепловыделения, температуру горения до температуры потухания. Известно, что при концентрации кислорода в смеси меньше 15%, горение прекращается, и если бы действие всех разбавителей сводилось только к

разбавлению смеси, тогда тушение можно было бы достичь при одном и том же количестве любого флегматизатора, а из теории горения известно, что огнетушащие концентрации НГ зависят от вида горючего, от условий подачи НГ и т.д.

В зависимости от физических свойств НГ по разному воздействуют на зону горения. Поступая в зону горения, они, имея температуру 20-30 °С, нагреваются до 1000 °С, отнимая за счет этого некоторое количество тепла. Количество отводимого тепла можно определить:

$$Q_{НГ} = V_{НГ} \cdot \rho_{НГ} \cdot C_{рНГ} \Delta t_{НГ},$$

где  $V_{НГ}$  – объем подаваемого нейтрального газа;

$\rho_{НГ}$  – плотность нейтрального газа;

$C_{рНГ}$  – удельная теплоемкость нейтрального газа;

$\Delta t_{НГ}$  – разность температур нейтрального газа и зоны горения.

Поэтому, чем выше теплоемкость НГ, тем они эффективнее.

Некоторые НГ увеличивают интенсивность теплоотвода за счет резкого повышения коэффициента теплопередачи газовой смеси  $\lambda_{см}^* \gg \lambda_{см}$ . Так действует *He*. Механизм действия НГ зависит от комплексного параметра  $\frac{C_p}{\lambda}$ . Чем эта величина будет больше, тем будет эффективнее НГ. Отсюда следует, что нейтральные газы действуют и по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, а также по механизму прекращения горения теплоотводом за счет нагрева нейтральных газов и за счет увеличения интенсивности теплоотвода из зоны горения.

### 7.2.2. Прекращение горения химически-активными ингибиторами

Таковыми огнетушащими веществами являются *галогидоуглеводороды*. К ним относятся: четыреххлористый углерод ( $CCl_4$ ), дибромметан ( $CH_2Br_2$ ), дибромэтан ( $C_2H_4Br_2$ ), тетрафтордидибромэтан ( $C_2F_4Br_2$ ), тетрафтордихлорэтан ( $C_2F_4Cl_2$ ) и т.д.

Использование этих веществ в качестве огнетушащих средств определяется такими физическими свойствами как плотность, температура кипения и плавления, вязкость, электропроводность.

Механизм тушения ХАИ (химически-активными ингибиторами) заключается в снижении скорости химической реакции или в снижении скорости тепловыделения в зоне реакции, или в расширении зоны реакции.

Из теории горения известно, что в процессе горения в зоне горения сначала образуются промежуточные продукты разложения горючего, потом продукты неполного окисления, потом продукты взаимодействия этих промежуточных продуктов между собой или окислителем. При этом стадия химической реакции может продолжаться при условии, что образуются активные частицы и радикалы, например:  $H^\bullet$ ,  $\dot{O}H$ ,  $\dot{C}H_2$  и т.д. Вступая во

взаимодействие с другими промежуточными продуктами, они продолжают цепные реакции как разветвленные, так и неразветвленные. Если в зону протекания таких реакций ввести другие вещества, которые приведут к нейтрализации активных центров, то произойдет обрыв реакций. При этом, чем будет интенсивнее происходить нейтрализация активных центров, тем эффективнее будет тормозящее действие ингибиторов. Гибель активных центров при введении в зону горения галоидоуглеводородов будет тогда, когда активные центры, образовавшиеся в зоне горения, будут вступать во взаимодействие с радикалами, содержащими галоген.

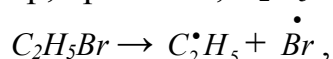


В свою очередь,  $HBr$  является ингибитором, т.е. из зоны горения в результате протекания таких реакций выведены два активных атома водорода, т.е. оборваны две цепочки и возникли две молекулы ингибитора  $HBr$ .

Таким образом, в уравнении скорости химической реакции:

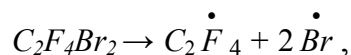
$$v = K \cdot C_A^\alpha \cdot C_B^\beta \cdot e^{-E/RT},$$

резко уменьшается константа  $K$  (на несколько порядков) и увеличивается энергия активации  $E$ , в то время как концентрация  $C_A$  и  $C_B$  практически не изменяется. Теплофизические параметры смеси, такие как теплоемкость, теплопроводность, тоже практически не изменяются. Это объясняется тем, что для торможения химической реакции в зону горения вводят всего 2-3 % ингибитора, т.е. более, чем в 10 раз меньше, чем, например, необходимо вводить нейтральных газов (30-55 %). Кроме того, следует иметь в виду, что некоторые соединения, например, бромэтил,  $C_2H_5Br$  разлагаются:



Затем радикал  $C_2H_5\dot{C}$  окисляется до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Поэтому данное соединение эффективно для тушения богатых смесей, т.к. при горении  $C_2H_5\dot{C}$  происходят затраты кислорода, которого в богатых смесях и без того мало. Недостатком данного соединения является то, что оно является горючим и неэффективно для тушения бедных смесей.

Наиболее широко применяется фреон 114B2, тетрафтордибромэтан ( $C_2F_4Br_2$ ). При распаде в зоне горения молекул этого вещества отщепляются два атома брома:



а радикал  $C_2F_4\dot{C}$  является насыщенным и в зоне горения действует как "инертная масса". Так как молекулы этого вещества являются тяжелыми ( $M=260$  г/моль) и они обладают большой теплоемкостью, то при введении этого вещества в зону горения могут существенно изменяться и теплофизические свойства смеси.

Все галоидоуглеводороды, которые применяются в пожаротушении, за небольшим исключением, являются жидкостями. Они могут обеспечивать пожаротушение за счет охлаждающего эффекта, но так как теплота их

испарения в 10-15 раз меньше, чем теплота испарения воды, то охлаждающий эффект не является решающим.

Галоидоуглеводороды, применяемые для тушения пожаров, главным образом, бромфторхлорпроизводные метана и этана. Промышленное их название фреоны, хладоны, а торговое – галлоны. Существуют несколько систем их условного обозначения, например, последняя цифра – это число атомов фтора, предпоследняя цифра – число атомов водорода увеличенное на единицу, а первая – число атомов углерода уменьшенное на единицу,

*B* – показывает, что в молекулу входят атомы брома, а цифра показывает количество атомов брома.

Если в молекуле есть атомы хлора ( $C_n(HClF)_{2n+2}$ ), то согласно этой системе, число атомов хлора не указывается, а рассчитывается.

Например,  $C_2HF_3BrCl$  – трифторхлорбромэтан, 123B1, где

3 – число атомов фтора;

2 – число атомов водорода плюс 1 (1+1);

1 – число атомов углерода минус 1 (2-1);

*B* – наличие атомов брома;

1 – число атомов брома, равное единице.

Число атомов хлора рассчитывается следующим образом: сумма атомов водорода, хлора, фтора, брома ( $nH+nCl+nF+nBr$ ) должна быть равна  $2 \cdot 2 + 2 = 6$  (т.к. это соединение является производным от этана, то сумма атомов всех элементов должна быть равна 6. В молекуле один атом углерода, водорода один атом, фтора три атома, брома один атом, т.е. суммарное количество атомов равно 5, значит, на хлор приходится один атом ( $6 - 5 = 1$ ).

Исходя из этой классификации химические названия хладонов будут следующими:

115 – пентафторхлорэтан;

123 – трифтордихлорэтан;

243B2 – дибромтрифтор пропан;

253 – трифторхлорпропан.

Согласно этой классификации фреон 13B1 – это трифторбромметан ( $CF_3Br$ ), а фреон 12B1 – это дифторбромхлорметан ( $CF_2BrCl$ ).

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 в том, что после тушения они быстро испаряются, благодаря чему исключается повторная воспламеняемость. Они обладают высокой морозоустойчивостью.

К недостаткам химически-активных ингибиторов относятся:

-они токсичны, их опасно применять в тесных, плохо проветриваемых помещениях, таких как шахты, бомбоубежища, подвалы. .

- нельзя применять при тушении пожаров, которые сопровождаются тлением (уголь), т.к. могут образовываться токсичные продукты пиролиза.

- нельзя применять при тушении пожаров легких металлов (*Mg, Al, Na*), т.к. при взаимодействии ХАИ с *Me* может произойти взрыв.

ХАИ применяют в ручных огнетушителях, автоматических установках пожаротушения и в установках взрывоподавления.

Нейтральные газы, химически активные ингибиторы применяют при тушении пожаров как открытых, так и в помещениях. Наибольшее применение НГ и ХАИ нашли в автоматических стационарных установках пожаротушения, обеспечивающих объемное тушение в помещениях. Рекомендуются стационарными установками оборудовать помещения объемом до 6000 м<sup>3</sup>.

### ***7.2.3. Расчёт параметров пожаротушения при использовании негорючих газов и химически-активных ингибиторов***

При расчёте параметров пожаротушения с использованием ХАИ и НГ обычно решаются две задачи:

1) По известному допустимому времени тушения определяют расход огнетушащего вещества.

2) По известному расходу определяют время тушения, т.е. время создания огнетушащей концентрации в защищаемом помещении.

Для тушения пожаров необходимо правильно рассчитать общее количество огнетушащего вещества, интенсивность подачи и время тушения.

Параметрами пожаротушения являются:

1) Удельный расход – это количество (объем или масса) огнетушащего вещества, подаваемое на единицу площади пожара,  $\text{кг}/\text{м}^2$  (при поверхностном тушении), или на единицу объема,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (при объемном тушении).

$$q_{y\partial} = \frac{G_{oc}}{F_n},$$

где  $G_{oc}$  – количество огнетушащего вещества, кг или  $\text{м}^3$ ;

$F_n$  – площадь пожара.

2) Время тушения ( $\tau_T$ ) – время с начала подачи огнетушащего средства до полного прекращения горения, с, мин.

3) Секундный расход ( $q_{oc}$ ) – количество (масса или объем) огнетушащего средства, подаваемое в единицу времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ , л/с:

$$q_{oc} = \frac{G_{oc}}{\tau_T}.$$

4) Интенсивность подачи ( $J_{oc}$ ) – это количество (объем или масса) огнетушащего средства, подаваемое на единицу площади пожара за единицу времени (при поверхностном тушении),  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ , или к единице объема за единицу времени (при объемном тушении),  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$

$$J_{oc} = \frac{G_{oc}}{\tau_T \cdot F_n} = \frac{q_{oc}}{F_n}.$$

Удельный расход, интенсивность подачи огнетушащего средства и время тушения связаны между собой:

$$q_{y\partial} = J_{oc} \cdot \tau_T = \frac{q_{oc}}{F_n} \cdot \tau_T.$$

При тушении НГ или ХАИ придельные огнетушащие концентрации равны:

$Ar \approx 54\%$ ,  $He \approx 37\%$ ,  $CO_2 \approx 25\%$ ,  $C_2F_4Br_2 \approx 2\%$ , следовательно, удельный расход будет составлять:

для  $Ar$   $q_{y\partial} \approx 1.18$ , т.к. на  $54\%$  аргона в смеси будет приходится  $46\%$  горючей смеси, т.е.  $\frac{54}{46} = 1.18$ ;

для  $He$   $q_{y\partial} = 0.59$ , т.к.  $\frac{37}{63} \approx 0.59$ ;

для  $CO_2$   $q_{y\partial} = 0.33$ , т.к.  $\frac{25}{75} = 0.33$ ,

а для  $C_2F_4Br_2$   $q_{y\partial} = 0.02$ , т.к.  $\frac{2}{98} \approx 0.02$ .

При создании систем пожаротушения известными параметрами являются:

$V_{II}$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ ;

$\varphi_{oc}$  – огнетушащая концентрация НГ или ХАИ, в объемных долях;

$\tau_T$  – допустимое время тушения, с.



Если при подаче нейтрального газа или ХАИ в объем помещения утечки отсутствуют, тогда:

$$V_{НГ} = V_{П} \cdot \varphi_{ОС},$$

где  $V_{НГ}$  - объем нейтрального газа, необходимый для тушения пожара.

Расход нейтрального газа при известном времени тушения будет равен

$$q_{ОС} = \frac{V_{НГ}}{\tau_T} = \frac{V_{П} \cdot \varphi_{ОС}}{\tau_T}.$$

Если задан секундный расход, тогда время тушения равно

$$\tau_T = \frac{V_{П} \cdot \varphi_{ОС}}{q_{ОС}}.$$

Количество нейтрального газа или ХАИ, необходимое для тушения пожара, равно

$$G_{НГ} = V_{НГ} \cdot \rho_{НГ} = V_{П} \cdot \varphi_{ОС} \cdot \rho_{НГ}.$$

В реальных пожарах невозможно обеспечить подачу НГ или ХАИ в объем помещения без утечки. При подаче НГ или ХАИ в помещение нейтральный газ перемещается в объеме помещения вместе с воздухом, и часть его вытесняется из помещения:

$$\Delta q_{НГ} = q_{НГ} - q_{НГ}^{вм},$$

где  $q_{НГ}$  – секундный расход нейтрального газа;

$q_{НГ}^{вм}$  – секундный расход нейтрального газа, вытесняемого из помещения;

$\Delta q_{НГ}$  – количество нейтрального газа, добавляемого в помещение в любой момент времени;

$\Delta q_{НГ}$  – ведёт к повышению концентрации НГ в помещении вплоть до огнетушащих концентраций ( $\varphi_{ОС}$ ).

Время тушения можно рассчитать исходя из выражения:

$$\tau_T = \frac{V_{П}}{q_{НГ}} \ln \frac{1}{1 - \varphi_{ОС}}.$$

Упрощенная формула для расчета времени тушения выглядит следующим образом:

$$\tau_T = \frac{2V_{ном} \cdot \varphi_{ОС}}{2q_{НГ} - q_{Г} \cdot \varphi_{ОС}}.$$

Зная время тушения, можно определить требуемый запас НГ или ХАИ, необходимый для тушения пожара в помещении:

$$V_{НГ} = q_{НГ} \cdot \tau_T = V_{П} \cdot \ln \frac{1}{1 - \varphi_{ОС}}$$

или

$$G_{НГ} = V_{П} \cdot \rho_{НГ} \cdot \ln \frac{1}{1 - \varphi_{ОС}}.$$

По мере развития пожара увеличивается поток газов, который выходит через проёмы в результате газообмена и уносит с собой часть огнетушащего вещества, при этом скорость подачи нейтрального газа или ХАИ остаётся

постоянной, т.к. зависит от производительности автоматической установки пожаротушения (АУПТ). Потери негорючего газа возрастают, когда скорость подачи НГ будет равна скорости его выноса из помещения, тушение станет невозможным. Такая скорость подачи называется критической или критическим расходом, который определяется из выражения:

$$q_{НГ}^{крит} \approx 1/2 q_2 \cdot \varphi_{OC},$$

где  $q_Г$  – расход горячего газа через проёмы, м<sup>3</sup>/с.

Массовый расход газа ( $G_2$ ) определяется в зависимости от расположения нейтральной зоны:

- 1) если  $h_{НЗ} > H_6$ , тогда  $G_2 = 0$ ;
- 2) если  $H_H < h_{НЗ} < H_6$ , тогда  $G_2 = 2/3 \mu (F_{np} - F_1 / \sqrt{2q(H_6 - h_{НЗ}) \rho_{ПГ} (\rho_6 - \rho_{ПГ})})$ ;
- 3) если  $h_{НЗ} > H_H$ , тогда  $G_2 = 2/3 \mu \cdot F_{np} \sqrt{2qH_{np} \cdot \rho_{ПГ} (\rho_6 - \rho_{ПГ})}$ .

Высота нейтральной зоны определяется из выражения:

$$h_{НЗ} = \frac{H_{ном}}{2} - \frac{R(\rho_{ПГ} \cdot T_n - \rho_6 T_6)}{q(\rho_{ПГ} - \rho_6)}.$$

Если  $q_{НГ}^{крит} > q_{НГ}$ , где  $q_{НГ}$  – это производительность установки пожаротушения, тогда тушение пожара невозможно.

Если  $q_{НГ}^{крит} < q_{НГ}$ , тогда тушение пожара возможно.

Следует учесть, что  $G_2$  – массовый расход газа из помещения, а  $q_Г = \frac{G_2}{\rho_2}$ , м<sup>3</sup>/с.

Зная секундный расход горючей смеси, можно вычислить требуемый секундный расход огнетушащего вещества:

$$q_a^{TP} \text{ для кинетического пламени равен } q_{OC}^{TP} = q_{ГС} \cdot q_{yd}'.$$

Учитывая, что в этом случае секундный расход огнетушащего вещества совпадает с интенсивностью его подачи, тогда

$$G_{OC} = J_{OC} \cdot \tau_T \text{ или } G_{OC} = q_{OC} \cdot \tau_T.$$

Учитывая инженерный коэффициент запаса:

$$G_{OC} = \kappa_3 \cdot q_{OC} \cdot \tau_T = \kappa_3 \cdot q_{ГС} \cdot q_{yd}'$$

При диффузионном горении газов коэффициент использования НГ или ХАИ зависит от условий подачи, от размеров и формы факела, от состояния окружающей среды и т.д.

Поэтому, при расчёте количества огнетушащего средства вводится коэффициент использования ( $K_H$ ), который равен отношению удельного расхода огнетушащего средства, фактически участвующего в тушении, к практическому удельному расходу огнетушащего средства, поданного на тушение:

$$K_H = \frac{q_{OC}^{\phi}}{q_{OC}^{\Pi}} < 1$$

$$q_{OC}^{\Phi} = K_{II} \cdot q_{OC}^{\Pi},$$

т.е.

$$q_{OC}^{\Pi} = \frac{q_{OC}^{\Phi}}{K_{II}} = \frac{q_{ГС} \cdot q'_{y\delta} \cdot K_3}{K_{II}}$$

или

$$Q_{OC}^{\Pi} = \frac{Q_{OC}^{\Phi}}{K_{II}} = \frac{K_3 \cdot q_{ГС} \cdot q'_{y\delta} \cdot \tau}{K_{II}}.$$

### Задача 1:

Углекислый газ подают в помещение с расходом, равным 12 м<sup>3</sup>/с. Размеры помещения 16x8x4 м, число оконных проёмов 3, размеры 2x1,6 м, размеры дверного проёма 2,2x1 м, линейная скорость распространения пожара 1,0 м/мин. Горючее вещество – 100 кг бензина, низшая теплота сгорания 41900 кДж/кг, подача огнетушащего средства начнётся через 10 минут с начала пожара, все проёмы открыты. Расстояние от пола до подоконника 0,8 м,  $V'_e = 11,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Возможно ли тушение пожара, если огнетушащая концентрация  $CO_2$  равна 25 %?

### Решение:

1. Определить высоту нейтральной зоны:

$$h_{н.з} = \frac{H_{np}}{\left(\frac{\rho_e}{\rho_{ПГ}}\right)^{0,666} + 1} + B.$$

2. Для определения плотности продуктов горения необходимо знать среднеобъёмную температуру пожара в помещении, и для этого необходимо определить режим пожара (ПРН или ПРВ):

а) определить  $P_{\kappa}$  и  $P_{\kappa.кр}$ :

$$P_{\kappa} = \frac{\rho_i \cdot Q_{H_i}}{(6F_{пола} - \sum F_{np}) \cdot Q_{н.др}} = \frac{100 \cdot 41900}{(6 \cdot 128 - 11,8) \cdot 16500} = 0,34 \text{ кг/м}^2;$$

$$P_{\kappa.кр} = \frac{4500\Pi^3}{1 + 500\Pi^3} + \frac{V'^{0,333}}{6V'_e{}^0};$$

$$\Pi = \sum F_{np} \cdot \sum h_n^{0,5} / F_{пола} = 11,8 \cdot 2,1^{0,5} / 128 = 0,13;$$

$$h_{np} = \frac{\sum h_i F_{inn}}{\sum F_{inn}} = 2,1;$$

$$P_{\kappa.кр} = \frac{4500 \cdot (0,13)^3}{1 + 500 \cdot (0,13)^3} + \frac{(512)^{0,333}}{6 \cdot 11,6} = 4,80 \text{ кг/м}^2.$$

Так как  $P_{\kappa} < P_{\kappa.кр}$ , в помещении будет пожар регулируемый нагрузкой.

2. Среднеобъёмная температура в помещении равна

$$t_{\max} = 224 P_{\kappa}^{0,528} + t_0 = 224 \cdot 0,34^{0,528} + t_0 = 147 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

3. Плотность продуктов горения и воздуха при  $t=147 \text{ }^{\circ}\text{C}$  равны

$$\rho_{ПГ} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_{\max})} = \frac{30}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 147)} = 0,86 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\epsilon} = \frac{M}{V_0(1+0,00367 \cdot t)} = 1,21 \text{ кг/м}^3.$$

4. Высота нейтральной зоны равна

$$h_{н.з.} = \frac{h_{np}}{\left(\frac{\rho_{\epsilon}}{\rho_{III}}\right)^{0,666} + 1} + B = \frac{2,1}{\frac{1,21}{0,86} + 1} + 0,8 = 1,75 \text{ м.}$$

5. Так как  $H_H < h_{н.з.} < H_6$ , то расход уходящих газов через проёмы равен

$$q_{\Gamma} = \frac{3}{2} \mu \frac{\left(\sum F_{np} - F_1\right)}{\rho_{III}} \sqrt{2q(H_6 - h_{н.з.})\rho_{III}(\rho_{\epsilon} - \rho_{III})};$$

$$F_1 = \frac{1}{3} \sum F_{np} = \frac{1}{3} \cdot 11,8 = 3,93 \text{ м}^2;$$

$$q_{\Gamma} = \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot \frac{(11,8 - 3,93)}{0,86} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot (2,8 - 1,76) \cdot 0,86 \cdot (1,21 - 0,86)} = 55 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Рассчитать расход подаваемого  $\text{CO}_2$ , при котором тушение не происходит:

$$q_{\text{CO}_2 \cdot \text{крит}} = \frac{1}{2} q_{\Gamma} \cdot \varphi_{\text{CO}_2};$$

$$\varphi_{\text{CO}_2} = 25 \% = 0,25 \text{ об.дол};$$

$$q_{\text{CO}_2 \cdot \text{крит}} = \frac{1}{2} \cdot 55,8 \cdot 0,25 = 6,97 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как  $q_{\text{CO}_2 \cdot \text{крит}} < q_{\text{CO}_2}$ , тушение возможно.

Ответ:

Тушение пожара возможно.

Задача 2:

Рассчитать количество аргона, необходимого для объёмного тушения пожара в аппарате, объём которого равен  $30 \text{ м}^3$ . Огнетушащая концентрация аргона равна  $54 \%$ , время тушения  $10 \text{ с}$ .

Решение:

1. Определить объём аргона, необходимого для тушения:

$$V_{Ar} = V_{II} \cdot \varphi_{Ar} = 30 \cdot 0,54 = 16,2 \text{ м}^3.$$

2. Рассчитать расход огнетушащего средства:

$$q_{OC} = \frac{V_{Ar}}{\tau} = \frac{16,2}{10} = 1,62 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Рассчитать количество аргона необходимого для тушения:

$$G_{Ar} = V_{Ar} \cdot \rho_{Ar};$$

$$\rho_{Ar} = \frac{M}{V_0(1+0,00367 \cdot t)},$$

где  $V_0$  – объём 1 моля, при нормальных условиях, равный  $22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ;  
 $t$  – температура аргона.

$$\rho_{Ar} = \frac{40}{22,4 \cdot (1+0,00367 \cdot 25)} = 1,64 \text{ кг/м}^3;$$

$$G_{Ar} = 16,2 \cdot 1,64 = 2,7 \text{ кг}.$$

Ответ:

$$G_{Ar} = 2,7 \text{ кг} .$$

Для тушения кинетического пламени газовой смеси требуемый секундный расход огнетушащего средства рассчитывается по формуле:

$$q_{OC} = q_{GC} \cdot q'_{y\partial} ,$$

где  $q_{GC}$  – расход горючего газа;

$q'_{y\partial}$  – удельный расход огнетушащего вещества, величина безразмерная, показывающая отношение объема огнетушащего средства к объёму горючей смеси:

$$q'_{y\partial} = \frac{V_{OC}}{V_{GC}} .$$

Количество огнетушащего средства, требуемое для тушения, рассчитывается:

$$G_{OC} = J_{OC} \cdot \tau_T = q_{OC} \cdot \tau_T ,$$

т.к. секундный расход огнетушащего средства совпадает с интенсивностью его подачи, где  $\tau_T$  - время тушения, с.

Для газовых факелов время тушения принимают, условно равным 4÷5 с. С учетом коэффициента запаса надёжности ( $K_3=2\div3$ ) требуемый объём газообразного огнетушащего средства равен

$$G_{OC} = K_3 \cdot J_{OC} \cdot \tau_T = K_3 \cdot q_{GC} \cdot q'_{y\partial} \cdot \tau_T .$$

### Задача 3:

Рассчитать удельный расход и требуемое количество азота, необходимое для тушения метано-воздушной смеси стехиометрического состава, если огнетушащая концентрация его равна 35 %, а секундный расход газовой смеси 60 л/с.

### Решение:

1. Удельный расход азота равен

$$q'_{y\partial} = \frac{35}{65} = 0,54 ,$$

т.е. в 1 л газовой смеси азота должно быть 0,54 л.

2. Расход огнетушащего вещества (азота) равен

$$q_{N_2} = q_{GC} \cdot q'_{y\partial} = 60 \cdot 0,54 = 32,4 \text{ л/с} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с} .$$

3. Плотность азота равна

$$\rho_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t)} = \frac{28}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 25)} = 1,14 \text{ кг/м}^3 .$$

4. Количество азота, необходимого для тушения в течении 1 с, равно

$$G_{N_2} = q_{N_2} \cdot \rho_{N_2} \cdot \tau_T = 0,032 \cdot 1,14 \cdot 1 = 0,036 \text{ кг} .$$

### Ответ:

$$G_{N_2} = 0,036 \text{ кг} .$$

При горении жидкости над её поверхностью в каждую секунду образуется определённый объём горючей смеси, который пропорционален приведённой массовой скорости выгорания и площади пожара. Следовательно, скорость подачи ОС, т.е. скорость создания огнетушащей концентрации, должна соответствовать скорости образования горючей смеси.

Для решения задачи о количестве необходимого огнетушащего средства для объёмного тушения надо:

1. Определить скорость образования горючей смеси:

$$q_{GC} = v'_m \cdot F_n (V_e^0 + 1),$$

где  $v'_m$  – массовая скорость выгорания жидкости, кг/м<sup>2</sup>·с;

$F_n$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;

$V_e^0$  – теоретически необходимый объём воздуха для сгорания 1 кг паров данной жидкости, м<sup>3</sup>/кг.

2. Определить требуемый расход огнетушащего вещества.

При использовании для тушения огнетушителей, зная их производительность, можно рассчитать их количество, а также площадь тушения одним огнетушителем.

#### Задача 4:

Определить количество огнетушителей, необходимых для тушения разлива керосина на площади 10 м<sup>2</sup>. Огнетушители заполнены диоксидом углерода, огнетушащая концентрация которого 25 %, производительность одного огнетушителя 0,5 м<sup>3</sup>/с,  $V_e^0 = 11,36$  м<sup>3</sup>/кг,  $v'_m = 2,3$  кг/м<sup>2</sup>·мин. Определить площадь тушения одним огнетушителем.

#### Решение:

1. Рассчитать секундный расход газовой смеси:

$$q_{GC} = 2,3 \cdot 10 \cdot (11,36 + 1) = 284,3 \text{ м}^3/\text{мин} = 4,74 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Рассчитать требуемый расход огнетушащего вещества:

$$q_{CO_2}^{TP} = q_{GC} \cdot \varphi_{CO_2} = 4,74 \cdot 0,25 = 1,18 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Рассчитать необходимое количество огнетушителей:

$$n_{огн} = \frac{q_{CO_2}^{TP}}{q_{CO_2}} = \frac{1,18}{0,5} = 2,36,$$

т.о. необходимо 3 огнетушителя.

4. Определить площадь тушения одним огнетушителем:

а)  $q_{GC} = v'_m (V_e^0 + 1) = 2,3 \cdot (11,36 + 1) = 28,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин} = 0,47 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с};$

б) площадь тушения одним огнетушителем равна

$$F_n = \frac{q_{CO_2}}{q_{GC}} = \frac{0,5}{0,47 \cdot 0,25} = \frac{0,5}{0,1175} = 4,26 \text{ м}^2.$$

#### Ответ:

$F_n = 4 \text{ м}^2$ ; необходимо 3 огнетушителя.

### Задача 7:

Рассчитать коэффициент использования воды при объемном тушении газового фонтана с дебитом 3,5 млн м<sup>3</sup>/сут, если фактический расход воды составляет 170 л/с, удельный расход воды равен 2 л/м<sup>3</sup>.

### Решение:

1. Расход газовой смеси равен

$$q_{ГС} = \frac{3,5 \text{ млн} \cdot \text{м}^3}{\text{сут}} = \frac{3,5 \cdot 10^6}{24 \cdot 3600} = 40,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Требуемый секундный расход воды на тушение равен

$$q_B^{mp} = q_{ГС} \cdot q_{уд} = 40,5 \cdot 2 = 81 \text{ л/с}.$$

$$3. K_u = \frac{q_B^{TP}}{q_B^{\Phi}} = \frac{81}{170} = 0,48.$$

### Ответ:

$$K_u = 0,48.$$

## **7.3. ПЕНЫ И ПОРОШКОВЫЕ СОСТАВЫ**

### ***7.3.1. Пены как огнетушащие вещества***

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.

Независимо от способа получения пены обладают рядом свойств:

#### 1) Структура пены

Структура пены определяется соотношением объемов газовой и жидкой фаз в единице объема пены. Если объем газовой фазы превышает объем жидкости в 10-20 раз, то ячейки имеют сферическую форму. В таких пенах оболочка пузырьков имеет достаточно большую толщину. При увеличении соотношения  $\frac{V_{Г}}{V_{ж}}$  толщина пленки уменьшается, и ячейки трансформируются

в многогранник. Если соотношение  $\frac{V_{Г}}{V_{ж}}$  достигает десятков сотен, то ячейки приобретают полиэдрическую (многогранную) форму при этом утоньшаются стенки, т.е. происходит старение пены.

#### 2) Кратность пены

$K_{П} = \frac{V_{п}}{V_{ж}}$  – это отношение объема пены к объему жидкости, из которой она получена. Различают пены низкой кратности  $K_{П} \leq 20$ , средней кратности  $20 < K_{П} \leq 200$ , высокой кратности  $K_{П} > 200$ .

Величина  $\beta = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\Pi}}$  – отношение объема газа в пене к объему пены – называется газосодержанием. Газосодержание и кратность связаны между собой:

$$\beta = \frac{K_{\Pi} - 1}{K_{\Pi}} = 1 - \frac{1}{K_{\Pi}}.$$

### 3) Дисперсность пены

Дисперсность пены оценивается либо средним размером пузырька, либо распределением пузырьков пены по размерам. Чаще всего под дисперсностью понимают величину, обратную среднему размеру пузырьков:

$$D_{\Pi} = \frac{1}{d_{cp}}.$$

Дисперсность пены характеризуется удельной поверхностью раздела фаз. Пены могут быть высоко-дисперсными и низко-дисперсными. 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.

### 4) Вязкость

Оценивается или коэффициентом динамической вязкости ( $\mu$ ), или напряжением сдвига ( $\sigma$ ). Пены обладают свойствами "твердого тела", т.е. они могут 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. Плотность пены может быть равна  $0.5\rho$ , где  $\rho$  – плотность жидкой фазы, и изменяться до значений, близких к  $\rho_{газа}$ . Плотность пены зависит от степени ее разрушения.

### 5) Теплопроводность пены

Теплопроводность пены из-за наличия газа очень мала.

### 6) Электропроводность пены

Чем больше жидкости в пене, тем выше электропроводность

$$\frac{\chi_0}{\chi_{\Pi}} = \frac{3}{2} K_{\Pi},$$

где  $\chi_0$  – удельная электропроводность раствора;

$\chi_{\Pi}$  – удельная электропроводность пены.

### 7) Стойкость пены

Стойкость пены – это время, в течение которого выделяется из пены 50 % объема жидкости, взятой для пенообразования. Неустойчивость пены объясняется избытком поверхностной энергии, т.е. состояние равновесия будет тогда, когда пена превратится в жидкость и газ, т.е.



прекратит свое существование. Поэтому 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. Для повышения стойкости пены в пенообразователь вводят стабилизаторы. Эффективные стабилизаторы – карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), поливиниловый спирт и т.д. Увеличивая вязкость раствора, они способствуют замедлению истечения жидкости. Интенсивность разрушения пены определяется по формуле:

$$J_{разр} = \frac{\Delta V_{п}^{разр}}{V_{п}} \cdot \frac{1}{\Delta \tau},$$

где  $\Delta V_{п}^{разр}$  - объем пены, которая разрушилась за данный промежуток времени;

$V_{п}$  – начальный объем пены;

$\Delta \tau$  – промежуток времени, в течение которого проводится наблюдение.

Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит от температуры окружающей среды, дисперсности, толщины стенок пузырьков

$$S = f\left(\frac{1}{t_{окр}}; D_{п}; \delta_{ст}\right),$$

а толщина стенок

$$\delta_{ст} = \frac{d_{п}}{K_{п}},$$

где  $d_{п}$  – диаметр пузырьков;

$K_{п}$  – кратность пены.

Стойкость пены зависит от высоты пенного слоя. Чем выше слой, тем ниже скорость истечения жидкости, значит, стойкость пены будет выше, а при тушении пожара стойкость пены зависит от способа подачи.

#### 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.

Механизм прекращения горения пеной:

1) Образуется локальный слой пены на поверхности горячей жидкости, который зависит от соотношения скоростей разрушения пены и интенсивности подачи. Охлаждение слоя жидкости происходит в результате снижения скорости испарения и, как следствие, происходит снижение температуры пожара.

2) После образования локального слоя происходит снижение интенсивности теплового потока от пламени к поверхности жидкости и снижается температура горения.

Дополнительные факторы: разбавление горючей паровоздушной смеси парами воды, т.к. раствор, т.е. вода, которая входит в состав пены, испаряется и становится флегматизатором. При испарении поглощается большое количество тепла.

Изолирующая способность пены зависит от таких параметров, как парогазонепроницаемость, кратность, дисперсность, толщина стенки пузырьков пены, вязкость и т.д.

Пены являются универсальными огнетушащими средствами и используются для тушения жидких и твердых веществ. Нельзя тушить электроустановки, вещества, самовозгорающиеся при взаимодействии с водой.

Наибольшим охлаждающим эффектом обладают пены, низкой кратности, а наименьшим – высокократные пены.

Пены средней кратности применяют для тушения жидкостей и твердых веществ.

Пены низкой кратности применяются для защиты резервуаров, шахт от теплового излучения корабельных помещений, домов, хранилищ, расположенных вблизи очага. Эта пена может предотвратить повторное воспламенение. Низкократную пену используют при тушении на аэродромах, ею покрывают взлетную полосу, чтобы предотвратить искрение.

Высокократная пена применяется для тушения пожаров на кораблях, в библиотеках, архивах, в шахтах сероуглерода, для осаждения радиоактивных загрязнений из воздуха.

После ее применения пену можно разрушить водой или порошкообразным веществом.

Химические пены используются очень редко, можно получать при взаимодействии химических веществ между собой (карбонаты и соли металлов).

Воздушно-механическая пена. Получают в воздушно-пенных устройствах. Пенообразователь смешивают с водой инъекционным

способом: воздух засасывается водой через отверстия пеноствола. В зависимости от давления воды, пенообразователя и вида пеноствола получают низко-, средне-, и высокократные пены.

### 7.3.2. Расчет необходимого количества пенообразователя для тушения

При тушении пеной её подают двумя способами: на поверхность горючего материала и объёмным способом.

При тушении горючих жидкостей, разливов жидкостей, твёрдых горючих веществ пену подают на границу раздела для изоляции, в этом случае тушение называют тушением по поверхности.

При объёмном тушении пеной заполняется весь объём зоны горения или его часть.

Для каждого пенообразователя и вида горючего вещества существует оптимальная интенсивность подачи пены, так при тушении ЛВЖ оптимальная интенсивность подачи пены средней кратности принимается равной  $0,08 \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}$ , а для ГЖ –  $0,06 \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}$ , нормативное время тушения принимается равным 10 минутам.

Расход пенообразователя зависит от типа пеногенератора: для ГПС-200 он равен 2 л/с, для ГПС-600 – 6 л/с, ГПС-2000 – 20 л/с.

#### Задача :

Рассчитать число пеногенераторов и количество пенообразователя, требуемые для тушения разлива ацетона на площади  $500 \text{ м}^2$ , если для тушения используется пенообразователь САМПО с концентрацией 6 % и пеногенератор ГПС-200.

#### Решение:

1. Рассчитать требуемый расход пенообразователя:

$$q_{по} = F_n \cdot J = 500 \cdot 0,08 = 40 \text{ л/с} .$$

Ацетон – ЛВЖ, поэтому  $J=0,08 \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}$ .

2. Рассчитать число пеногенераторов:

$$n = \frac{q_{по}}{q_{гпс}} = \frac{40}{2} = 20 \text{ шт} .$$

3. Рассчитать требуемое количество пенообразователя:

$$G = n \cdot q_{гпс} \cdot \varphi \cdot \tau_T \cdot K / 100 ,$$

где  $n$  – число пеногенераторов;

$q_{гпс}$  - расход раствора из одного ГПС ;

$\tau_T$  - время тушения, с;

$K$ - коэффициент запаса, равный 3;

$\varphi$  - концентрация пенообразователя.

$$G = 20 \cdot 2 \cdot 0,06 \cdot 600 \cdot 3 = 4320 \text{ л} .$$

#### Ответ

Для тушения пожара необходимо 4320 л пенообразователя.

### 7.3.3. Порошковые огнетушащие составы

Все горючие вещества разделены на классы:

А – твердые вещества;

В – жидкие вещества;

С – газообразные вещества;

Д – щелочные металлы;

Е – вещества класса А-Д в присутствии электрического напряжения;

В зависимости от классификации горючих веществ различают три вида сухих огнетушащих порошков:

ВСЕ-порошки (на основе бикарбоната натрия);

АВСДЕ-порошки на основе фосфата аммония;

М-порошки для тушения металлов;

ВСЕ-порошки бывают двух сортов:

1) Нормальные, разрушающие пену;

2) Совместимые с пеной.

Порошки для тушения пожаров представляют из себя тонкодисперсные твердые вещества. Дисперсность достигает 15-20 мкм. Наибольшее распространение получили составы на основе бикарбонатов (ПСБ), которые применяют для тушения горючих газов, жидкостей, аппаратуры и электроустановок, находящихся под напряжением. ВСЕ-порошки используются для тушения пламени газов, но применять их для тушения тлеющих пожаров нецелесообразно.

Составы на основе фосфатно-аммонийных солей применяются для тушения углеродистых твердых горючих материалов.

Механизм действия ПОС (порошковых огнетушащих средств): первоначально ПОС действуют по механизму разбавления, так как частицы порошка очень малы, а затем, т.к. их тепловоспринимающая поверхность велика, они быстро прогреваются, забирая часть тепла из зоны горения. Чем меньше средний диаметр частиц порошка, тем тушение будет эффективнее. Но огнетушащие порошки значительного влияния на охлаждение зоны горения не оказывают. Поэтому существует опасность повторного воспламенения.

Для эффективного тушения повторно воспламеняющихся жидкостей используют комбинированные составы на основе пены и порошка. При этом порошок быстро сбивает пламя, а пена, поданная после порошка, предотвращает повторное воспламенение. Но, следует учесть, что если порошки содержат стеарат магния, то пена будет разрушаться. Поэтому разработаны порошки, совместимые с пеной (ВСЕ-SV). В качестве основы для таких порошков используется бикарбонат калия, а не натрия.

АВСДЕ-порошки пригодны для тушения пожаров всех классов, их называют порошки универсальные или общего назначения, но для тушения щелочных металлов их применять нельзя.

Смешивать ВСЕ- и АВСДЕ-порошки нельзя.

Для тушения металлов используется другой принцип тушения: металлы, прежде всего, необходимо изолировать от окружающего воздуха. Но большинство металлов при горении на воздухе могут взаимодействовать и с азотом. Цирконий, титан, магний, алюминий горят в атмосфере азота и углекислого газа. Поэтому разработан порошок, получивший название ПХК, в основе которого лежит хлорид калия – вещество, которое не взаимодействует ни с одним металлом, а кроме этого, ПХК хорошо тормозит горение жидкостей и газов. Этот порошок малогигроскопичен.

Огнетушащая эффективность порошков зависит от их текучести, гидрофобности (водоотталкивающие свойства), слеживаемости, совместимости с пеной, электропроводности, абразивного действия на вращающиеся части машин.

Считается, что огнетушащий эффект порошков также основан на создании стенки. Образовавшиеся в зоне горения активные частицы отдают порошковой стенке часть энергии, а оставшейся энергии становится недостаточно для продолжения горения. Это приводит к обрыву реакции и горение прекращается. АВСДЕ-порошки, кроме того, в зоне горения разлагаются с образованием полифосфатов, которые образуют в зоне горения стекловидный слой на поверхности горящего материала и горение прекращается, т.к. этот слой защищает поверхность от нагрева и разложения.

Применение порошков имеет следующие преимущества:

- порошковое облако создает защиту от теплового излучения,
- большой температурный диапазон для хранения порошков (от -50 до +60 °С),
- порошки нетоксичны,
- порошки универсальны.

К недостаткам порошковых огнетушащих средств относятся:

- сильное запыление;
- нельзя применять при тушении высоко чувствительных установок;
- нельзя использовать при тушении в библиотеках, архивах;
- порошковые составы обладают высокой слеживаемостью, комкуемостью и гигроскопичны.

## 7.4. Вода как огнетушащее средство

### 7.4.1. Огнетушащие свойства воды

Как показывает статистика примерно 90 % пожаров, в т.ч. крупных, потушено с помощью воды. Столь широкое применение воды обусловлено такими ее свойствами как негорючесть, доступность, высокая теплота парообразования, высокая температура разложения, низкая стоимость.

Вода эффективна как средство тушения для веществ в любом агрегатном состоянии.

Но воду нельзя применять для тушения:

1) Горючих веществ и материалов, с которыми вода вступает в интенсивное взаимодействие с выделением тепла и горючих компонентов, окись кальция, концентрированную серную кислоту.

2) Пожаров с температурой выше 1800-2000 °С, т.к. при этом пары воды диссоциируют с образованием водорода и кислорода.

3) Пожаров установок под высоким напряжением.

4) Раскаленного железа и угля, которые реагируют с кислородом и из водяного пара выделяется водород, который образует гремучую смесь с воздухом.

5) Горящих масел и жиров, особенно если применять компактную струю, тогда может произойти разбрызгивание или выброс.

6) При воздействии воды некоторые вещества набухают и возникает опасность выброса.

7) Водой нельзя тушить пожары жидкостей, у которых  $t_{кин} < 80$  °С.

Воду не применяют для тушения ацетилена, который получают из карбида кальция; раскаленного угля – из-за образования гремучего газа и  $CO$ ; пылеобразных веществ (при воздействии компактной струи может произойти взрыв пыли); если горящую жидкость тушить компактной струей, то вода может взрывообразно вскипеть; при тушении тлеющих масс в закрытых помещениях может произойти внезапное парообразование и ожог.

Одним из способов повышения огнетушащей эффективности воды является применение смачивателей. Например, такая добавка как 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. В отличие от пены при применении фаерсорба на поверхности горящих материалов создается защитный слой, который состоит из 98-99 % воды, которая обладает высоким охлаждающим эффектом. А пены, т.к. ячейки заполнены воздухом, обладают очень низкой охлаждающей способностью, кроме того, пена может быть сбита потоками воздуха, и после ее разрушения возникают новые очаги горения.

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. При использовании геля уменьшается ущерб от пролитой воды в жилых помещениях и зданиях, 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. Эффективно применение этой добавки и для тушения лесных пожаров.

Уголь, пыль, резину можно тушить водой со смачивателем. Водные растворы смачивателей применяют для тушения пожаров горючих веществ, которые плохо смачиваются водой. К смачивателям относятся поверхностно-активные вещества: мыла, моющие средства. Эти средства адсорбируются на поверхности раздела фаз вода-воздух. Эти вещества снижают поверхностное натяжение воды. В качестве смачивателя применяются органические сульфаты, сульфонаты, высокомолекулярные органические азотсодержащие соединения, полиэфир, полиамиды.

У воды поверхностное натяжение в несколько раз больше, чем у других жидкостей. Это 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, и капля теряет свою шарообразную форму. Синтетические смачивающие растворы отличаются от мыла большей устойчивостью. Они легко смешиваются с водой. Но смачивающие растворы способствуют коррозии, поэтому установки, которые длительное время находятся в контакте со смачивателями, должны иметь эффективную защиту от коррозии.

Вода обладает следующими достоинствами: термически стойкая, высокие теплоемкость и теплота испарения, относительная химическая инертность.

Отрицательные свойства: высокая температура замерзания, что затрудняет ее применение при низких температурах, малая вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения, в результате плохие смачивающие свойства воды, высокая электрогазопроводность.

По механизму прекращения горения вода относится к охлаждающим средствам. Но сам механизм прекращения горения зависит от условий горения, режима горения, вида горючего и его агрегатного состояния.

Вода используется при объемном тушении (газы, жидкости, ТГМ). Для этого целесообразно подавать воду объемно, заполняя максимально-возможную часть объема в зоне горения. Особенно, в этом случае, эффективно применение воды в виде распыленных и тонкораспыленных

струй. Компактная струя не окажет на зону горения существенного воздействия, если подавать компактную струю в факел газа (в устье), струя раздробится. Из-за высокого газодинамического напора струя воды может раздробить газовый поток, но этот процесс практически неуправляемый.

Распыленная струя воды имеет значительно большую поверхность контакта с факелом и меньшую скорость полёта, а, значит, большее время взаимодействия. При таком механизме прекращения горения необходимо, чтобы как можно большее количество воды испарилось в объеме факела, а не за его пределами. А если распыленную воду подают на горящую поверхность, то максимальный охлаждающий эффект будет иметься при полном испарении воды, поэтому вода должна быть в контакте с нагретыми поверхностями.

Если же компактной струёй тушить ЛВЖ или ГЖ, то вода опустится на дно и охлаждение поверхностных слоев не произойдет, может произойти взрывообразное вскипание.

Компактную струю воды применяют:

- 1) Чтобы поднять газовый факел, т.е. увеличить мертвую зону.
- 2) Для защиты близлежащих объектов.
- 3) При развившихся пожарах штабелей древесины (потому что распыленные струи не долетят до поверхности горящего материала).

Вода в виде распыленной струи применяется для тушения:

- тлеющих материалов;
- мазута и других нефтепродуктов с температурой кипения больше 80 °С;
- электроустановок (с соблюдением мер безопасности);
- в закрытых помещениях (объёмно) в виде пара.

В общем виде под огнетушащей эффективностью понимают минимальное количество огнетушащего вещества, необходимого для прекращения горения.

При практических способах тушения невозможно осуществить подачу воды в пламя, чтобы его температура снизилась до 1000 °С и, чтобы вода при этом полностью испарилась, т.е. требуемые удельные расходы воды в 5-10 раз меньше, чем реализуются на практике.

При тушении пожаров водой в закрытых помещениях кроме охлаждающего эффекта наблюдается эффект удушения. При испарении объем воды увеличивается в 1700 раз, благодаря этому кислород вытесняется из очага горения.

Если пожары тлеющие, то эффект удушения решающей роли не оказывает, т.к., кислород может содержаться в молекулах тлеющего горящего вещества, кроме этого, при тушении водой может проявляться эффект, основанный на разбавлении и растворении горящего вещества. Существует еще эффект расслоения (горючей смеси от источника воспламенения).

На огнетушащую эффективность воды оказывает влияние размер капель.



При добавках в воду солей щелочных металлов (карбонат и бикарбонат калия) с концентрацией 1; 2; 4; 5; 5.1 % огнетушащая эффективность увеличивается, например, при тушении нефтепродуктов в резервуаре с диаметром, равным 1 м ( $d=1$  м), тушение достигается водой с добавкой 5 % карбоната натрия за 10 с, чистой водой пожар потушить невозможно. Огнетушащий эффект в этом случае объясняют тем, что в зоне горения соль выделяется из раствора, под ее действием разрушаются перекиси, которые образовались при окислении, и горение прекращается.

При тушении лесных пожаров в Германии используют добавки карбоксилметилцеллюлозы натрия, диамонийфосфата и аммонийфосфата. Кроме этих добавок применяют добавки, увеличивающие вязкость воды. Благодаря этим добавкам вода прилипает к растениям, отнимает больше тепла, чем обычная вода. В качестве таких добавок использовались продукты, добываемые из морских водорослей или сульфинированный полифенилтолуол. Недостатком таких растворов является плохая распыляемость и бактериальное разложение.

Считается, что токсичность смачивателей, применяемых в пожаротушении, очень мала. Растворы смачивателей, применяемых для тушения, имеют концентрацию 0.5-5.1 %. Например, при тушении деревянного дома 1 %-ная добавка смачивателя позволяет уменьшить расход воды в пять раз и сократить продолжительность тушения.

Хорошо прекращается горение при использовании воды со смачивателями при тушении хлопка, кипы бумаг, древесной пыли и лесной почвы.

Таким образом, основными огнетушащими эффектами воды являются охлаждение и разбавление.

В общем виде под огнетушащей эффективностью понимают минимальное количество огнетушащего вещества, необходимого для прекращения горения.

#### **7.4.2. Механизм прекращения пламенного горения водой**

При подаче в зону горения тонкораспыленной воды, практически вся вода испарится с образованием пара. При этом основные механизмы отвода тепла следующие:

1) Снижение температуры в зоне горения:

– за счёт нагрева капелек воды до температуры кипения:

$$q_1 = C_B \cdot m_g \cdot \Delta t = C_B m_g (t_{\text{кип}} - t_0),$$

где  $C_B$  – теплоёмкость воды, 4.2 кДж/кг·°С;

$m_g$  – масса воды, 1 кг;

– за счёт затрат тепла на парообразование:

$$q_2 = \iota_g \cdot m_g,$$

где  $t_6$  – скрытая теплота парообразования, 2270 кДж/кг;

– за счёт затрат тепла на нагревание паров воды до температуры среды:

$$q_3 = C_p \cdot m_6 \Delta t_n = C_p \cdot m_6 (t_{пл} - 100),$$

где  $C_p$  – теплоёмкость пара в диапазоне температур от температуры кипения до температуры зоны горения.

Проведя все необходимые расчёты, считая, что горят углеводороды с максимальной низшей теплотой сгорания, и, учитывая, что для прекращения горения по механизму охлаждения от пламени надо отвести:

$$\Delta Q_{отв} \approx 0,1 Q_H,$$

получили, что количество тепла, отводимое водой из зоны горения будет равно

$$Q_{отв}^{yd} = 4400 \text{ кДж / кг },$$

т.е. при введении в зону горения 1 л воды при полном её испарении, нагреве паров до температуры пламени из зоны горения будет отведено 4400 кДж/кг тепла. В этом случае удельный расход воды на тушение диффузионного факела будет равен

$$q_6^{yd} = \frac{\Delta Q_{отв}}{Q_{отв}^{yd}} = \frac{0,1 Q_H}{4400} \approx 1 \text{ кг / кг },$$

т.е. 1 л воды на 1 кг горючей жидкости или горючего газа.

### **7.4.3. Коэффициент использования воды**

Учитывая, что в реальных пожарах не вся вода попадает в факел, и не вся вода будет нагреваться до 100°C и до температуры пламени, то количество тепла, отводимого от пламени будет примерно в 2 раза меньше, значит, удельный расход воды будет в 2 раза больше, но и эти значения на практике ещё в 5-10 раз меньше.

При тушении пламени газового фонтана водой секундный расход воды будет равен

$$q_6 = \frac{q_{ГГ} \cdot q_{yd}^6}{K_H},$$

где  $q_{ГГ}$  – секундный расход горючего газа, м<sup>3</sup>/с;

$q_{yd}^6$  – удельный расход воды на тушение пламени газового фонтана, л/м<sup>3</sup>;

$K_H$  – коэффициент использования воды.

С учетом времени тушения факела газового фонтана суммарный запас воды будет равен

$$G_6 = q_B \cdot \tau_T = \frac{q_{ГГ} \cdot q_{y\phi}^6}{K_{II}} \cdot \tau,$$

и с учетом инженерного запаса общий запас воды будет составлять:

$$G_6' = K_3 \cdot q_6 \cdot \tau_T = K_3 \cdot \frac{q_{ГГ} \cdot q_{y\phi}^6}{K_{II}} \cdot \tau_T,$$

где  $q_{ГГ}$  – дебит газового фонтана м<sup>3</sup>/с.

Коэффициент использования воды, также как и для НГ и ХАИ – это есть отношение расхода воды, фактически участвующей в тушении, к расходу воды, практически поданной для тушения. Расход воды фактически участвующей в тушении называют теоретическим расходом, а расход воды реально поданной на тушение называют фактическим:

$$K_{II} = \frac{q_6^{теор}}{q_6^ф}.$$

Теоретический расход рассчитать крайне сложно и зачастую он вообще неизвестен. Поэтому в качестве теоретического удельного расхода воды принимают наименьшее значение, полученное при обработке большого количества результатов тушения реальных пожаров. Такой расход называют требуемым ( $q_{y\phi}^{TP}$ ). Тогда

$$K_{II} = \frac{q_{y\phi}^{TP}}{q_{y\phi}^ф}.$$

Зависимость требуемого удельного расхода от площади пожара имеет вид:

$$\lg q_{y\phi}^{TP} = 1.1 \lg F_{II} - 0.203$$

Если площадь пожара превышает 50 м<sup>2</sup>, тогда

$$q_{y\phi}^{TP} = 0.5 \text{ л/м}^2.$$

Фактический расход воды определяют по количеству стволов, поданных на тушение, времени тушения и площади пожара:

$$q_{y\phi}^ф = \frac{(n_A \cdot q_A + n_B \cdot q_B) \cdot \tau_T}{F_n},$$

где  $n_A, n_B$  – количество стволов А и Б;

$q_A, q_B$  – расход ствола А и Б;

$F_n$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;

$\tau_T$  – время тушения, с.

Следовательно, коэффициент использования воды будет равен

$$K_U = \frac{0,5F_n}{(n_A q_A + n_B q_B) \cdot \tau}.$$

Для повышения эффективности воды используют водоаэрозольные установки. Струя водного аэрозоля создается при истечении перегретой воды. Для перегрева используют электроподогреватели, расположенные в рабочем объеме установок. Использование различных добавок позволяет получить высокодисперсный аэрозоль. Применение ПАВ способствует тому, что испарение частиц уменьшается на 20-40 %, что позволяет увеличить проникающую способность аэрозоля. Использование фторсодержащих добавок позволяет получать пленку на поверхности горючего материала. Использование низкомолекулярных добавок позволяет увеличить эффективность тушения древесины. Использование в качестве добавки раствора пенообразователя ПО-ЗАИ привело к снижению расхода водного аэрозоля, при этом визуально отмечалось повышение дисперсности капель воды и расширение струи.

#### **7.4.4. Расчет параметров пожаротушения при использовании воды**

Для расчёта коэффициента использования огнетушащего средства при поверхностном тушении необходимо знать теоретический удельный расход ОС и фактический. Удельный расход – это количество ОС, израсходованного на тушение единицы площади пожара ( $q_{y\phi}$ ) в л/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup> или кг/м<sup>3</sup>.

$$K_u = \frac{q_{y\phi}^{mp}}{q_{y\phi}^{\phi}}.$$

При тушении водой  $q_{y\phi}^{mp}$  рассчитывается из выражения:

$$\log q_{y\phi}^{TP} = 1,1 \log F_n - 0,203.$$

Фактический удельный расход воды определяется по числу введённых стволов, площади пожара и времени тушения. Расход стволов А принимается равным 7,4 л/с, стволов Б – 3,7 л/с.

#### **Задача 1:**

Определить коэффициент использования воды, если на тушение пожара площадью 250 м<sup>2</sup> было подано 3 ствола А и 5 стволов Б. Время тушения 35 минут.

#### **Решение:**

1. Рассчитать удельный требуемый расход воды:

$$\begin{aligned} \log q_{\text{yd}}^{\text{TP}} &= 1,1 \log F_n = 0,203 = 1,1 \log 250 - 0,203 = 2,43; \\ q_{\text{yd}}^{\text{mp}} &= 10^{2,43} = 269 \text{ л/м}^2. \end{aligned}$$

2. Рассчитать фактический удельный расход воды:

$$q_{\text{yd}}^{\phi} = \frac{(7,4 \cdot 3 + 3,7 \cdot 5) \cdot 35 \cdot 60}{250} = 341,9 \text{ л/м}^2.$$

3. Коэффициент использования воды равен

$$K_u = \frac{q_{\text{yd}}^{\text{TP}}}{q_{\text{yd}}^{\phi}} = \frac{269}{341,9} \approx 0,7.$$

Ответ:

$$K_u = 0,7.$$

Как показывает анализ статистических данных удельный требуемый расход воды можно рассчитывать из выражения:

$$q_{\text{yd}}^B = 0,5 F_n.$$

Задача 2:

Определить коэффициент использования воды при тушении пожара площадью  $80 \text{ м}^2$  в течении 15 мин, если был введен 1 ствол А и 2 ствола Б.

Решение:

1. Рассчитать удельный требуемый расход воды:

$$q_{\text{yd}}^{\text{mp}} = 0,5 \cdot F_n = 0,5 \cdot 80 = 40 \text{ л/м}^2.$$

2. Рассчитать фактический удельный расход воды:

$$q_{\text{yd}}^{\phi} = \frac{(7,4 \cdot 1 + 3,7 \cdot 2) \cdot 15 \cdot 60}{80} = 166,5 \text{ л/м}^2.$$

3. Коэффициент использования воды равен

$$K_u = \frac{q_{\text{yd}}^{\text{TP}}}{q_{\text{yd}}^{\phi}} = \frac{40}{166,5} = 0,24.$$

Ответ:

$$K_u = 0,24.$$

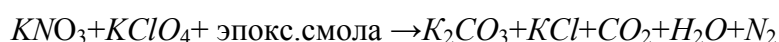
## 7.5. Аэрозольные огнетушащие средства

### 7.5.1. Применение аэрозольных средств пожаротушения

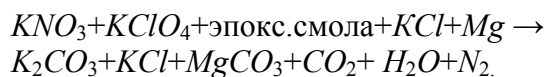
Объемное аэрозольное пожаротушение является одним из наиболее перспективных способов борьбы с пожарами.

Аэрозольные огнетушащие средства (АОС) получают в результате взаимодействия окислителя и восстановителя. В качестве окислителя могут использоваться, например, нитрат или перхлорат калия, а в качестве восстановителя – органические смолы и металлы.

Для аэрозольного пожаротушения используются следующие составы:



или



Этот состав генерирует большое количество аэрозоля.

Основной отличительной чертой газоаэрозольных средств пожаротушения является получение огнетушащего вещества путем сжигания твердотопливной композиции (ТТК). В своем составе они, как правило, имеют сильные окислители и соли ( $KNO_3$ ,  $KClO_4$ ,  $KCl$ ) и неорганические или органические соли щелочных металлов или эпоксидные смолы. При сгорании таких композиций образуются газоаэрозольные смеси, газовая фаза которых преимущественно состоит из  $N_2$ ,  $CO_2$ , а твердая фаза –  $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ , солей металлов. Частицы твердой фазы по своему воздействию на пламя близки к огнетушащим порошкам, но имеют существенно более высокую эффективность вследствие своего малого размера, диаметр частиц равен примерно 1 мкм. В обычных установках порошкового пожаротушения такие мелкие частицы получить невозможно. Огнетушащая эффективность их велика в результате большой удельной поверхности. Вследствие их малого объема происходит нагрев и интенсивная газификация частиц. Вследствие того, что на выходе температура газоаэрозольной смеси велика, они поднимаются к потолку и после охлаждения достаточно равномерно распределяются по всему объему, что позволяет классифицировать их как средства объемного тушения. Из-за малого размера частиц время оседания очень велико (несколько десятков минут), в этом случае важным становится вопрос потерь огнетушащего средства через проемы. При срабатывании генераторов аэрозольного пожаротушения в объеме помещения происходит перемешивание выше места установки генератора за счет динамики аэрозольной струи и за счет конвективных потоков. После опускания аэрозольной смеси происходит тушение нижерасположенных очагов пламени, даже таких, которые расположены в самых неудобных для тушения местах. Причем, экспериментально установлено, что расход огнетушащего

средства практически одинаков, что в герметичных, что в негерметичных помещениях. Проведенные эксперименты и практика тушения показали, что огнетушащие мелкодисперсные аэрозоли могут эффективно заменять объемные средства тушения. Установки аэрозольного пожаротушения приводятся в действие, и происходит сгорание заряда. Конденсированная фаза газоаэрозольной смеси, образовавшейся при сгорании, состоит преимущественно из твердых частиц солей и оксидов щелочных металлов. В газовой фазе преобладают азот, диоксид углерода, оксид углерода, окиси азота, цианистый водород, другие соединения.

АОС обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными средствами объемного пожаротушения: большой огнетушащей способностью; в отличие от ингибиторов аэрозольные огнетушащие средства не разрушают озоновый слой; обладают низкой токсичностью; не требуют системы трубопроводов, чтобы подавать АОС в очаг.

В тоже время при срабатывании АОС могут выделяться токсичные газообразные продукты. Поэтому одним из важных показателей является токсичность аэрозоля. К токсичным веществам относятся  $CO$ , окислы азота, их действие может проявляться непосредственно при действии на кожу, слизистые оболочки глаз, дыхательные пути. Поэтому разработаны нормы, которым должны удовлетворять генераторы огнетушащего аэрозоля, которые применяются для тех помещений, в которых осуществляется трудовая деятельность людей, в этих нормах устанавливается уровень безопасных концентраций продуктов аэрозольного генератора, при котором обеспечивается сохранение жизни и возможности людей покинуть опасную зону в условиях кратковременного (до 5 мин) воздействия на него огнетушащего аэрозоля:

$$CO - 3500 \text{ мг/м}^3;$$

$$N_xO_4 - 300 \text{ мг/м}^3;$$

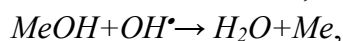
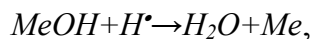
$$HCN - 100 \text{ мг/м}^3;$$

$$NH_3 - 700 \text{ мг/м}^3.$$

### 7.5.2. Механизм прекращения горения

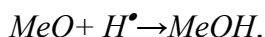
Механизм огнетушащего действия аналогичен действию огнетушащих порошков. Но многие исследователи считают, что огнетушащая эффективность аэрозолей обусловлена ингибированием пламени мелкодисперсными частицами аэрозолей солей металлов.

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.

Гидроксид может образовываться в результате сжигания заряда твердо-топливной композиции:



Установлено, что твердые частицы аэрозольных ОС 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.

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.

Таким образом, для повышения эффективности пожаротушения необходимо обеспечить охлаждение АОС. Для этих целей были разработаны генераторы огнетушащего аэрозоля (ГОА). Охлаждение аэрозоля достигается созданием многоходового течения аэрозоля по лабиринтным проходам с применением теплоемкого порошка, который размещается в специальных пазах по ходу течения. Температура АОС снижается ниже 100 °С.

Ликвидация горения тлеющих материалов одна из самых сложных проблем в пожаротушении. Для тлеющих материалов (фенолформальдегидные пласти, целлюлоза, полимеры, обладающие волокнистой структурой) характерны сильно развитая поверхность с наличием мелких пор и плохая смачиваемость. Трудность пожаротушения в том, что огнетушащие составы проникают в поры с большим трудом. Известен случай, когда тлеющая кипа хлопка находилась в реке в течение года и продолжала тлеть. Известно, что средства объемного тушения (прежде всего газовые составы) практически не тушат такие пожары.

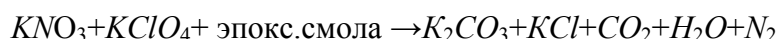
До настоящего времени не изучен механизм тлеющего горения: то ли это сугубо гетерогенный процесс, то ли это горение газов, которое происходит в порах материала. Специфичность такого горения в том, что газы горят внутри пор с чрезвычайно низкой скоростью, и в том, что в порах может иметься свой кислород.



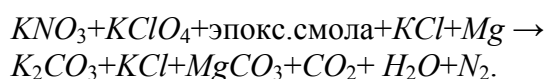
Решить задачу тушения попробовали с использованием генераторов огнетушащего аэрозоля при использовании твердотопливной композиции обогащенной фосфором и фосфатом калия в качестве конденсированной фазы. При испытаниях показана эффективность такого тушения.

Достоинством таких составов является высокая эффективность тушения. Это связано в большей степени с разбавлением воздуха помещения азотом, который образуется в факеле.

Для аэрозольного пожаротушения используются следующие составы:



или



Этот состав генерирует большое количество аэрозоля.

### Применение АОС

Для тушения пожаров, возникающих в вагонах электропоездов, водяные, пенные, порошковые и газовые установки по разным причинам не могут использоваться на подвижном транспорте.

Прибытие пожарных, как правило, происходит слишком поздно. Действия их осложняются из-за проблем обесточивания контактных проводов.

В результате проведенных работ создан генератор аэрозольного тушения СОТ-5м. Для инициирования системы срабатывания использованы магнетодинамические электрогенераторы, которые всегда готовы к работе.

Снижение температуры аэрозоля до безопасного уровня (не превышает безопасного предела для людей, а также для конструктивных и сложных элементов вагонов) было достигнуто применением специального генератора охлаждения, а также за счет выбора места установки.

Генераторы аэрозольного пожаротушения АГС-2 предназначены для тушения помещений объемом 200 м<sup>3</sup>: офисов, коммерческих палаток, торговых залов, складов, гаражных боксов; АГС-3 – для тушения небольших объемов (до 10 м<sup>3</sup>). Ими успешно тушат пожары в электрошкафах, в моторных отсеках автомобилей, катеров. Эти генераторы имеют относительно низкую температуру аэрозольной струи. Одним из направлений по снижению температуры аэрозольной струи является повышение давления в камере сгорания генератора, что позволяет вдвое снизить температуру.

## Глава 8 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУШЕНИЯ

### 8.1. Графический метод определения критической и оптимальной интенсивности подачи огнетушащего средства

Под оптимизацией параметров тушения понимают нахождение критической и оптимальной интенсивности подачи огнетушащего средства (ОС).

Критическая интенсивность – это максимальная интенсивность подачи огнетушащего средства, при которой время тушения стремится к бесконечности (тушения не происходит).

Существование критической интенсивности базируется на двух основных физико-химических явлениях:

1) Количество ОС недостаточно для снижения температуры горения до температуры потухания при тушении факела или до температуры воспламенения при тушении по поверхности.

2) Потери ОС в процессе тушения за счёт разрушения пены, уноса НГ ХАИ, порошков через проёмы при объёмном тушении, потери воды в виде проливов и т.д.

Оптимальная интенсивность подачи ( $J_{опт}$ ) – это интенсивность подачи ОС, при которой удельный расход огнетушащего средства  $q_{уд}$  является наименьшим.

Стандартная зависимость времени тушения от интенсивности подачи ОС имеет следующий вид (рис. 22):

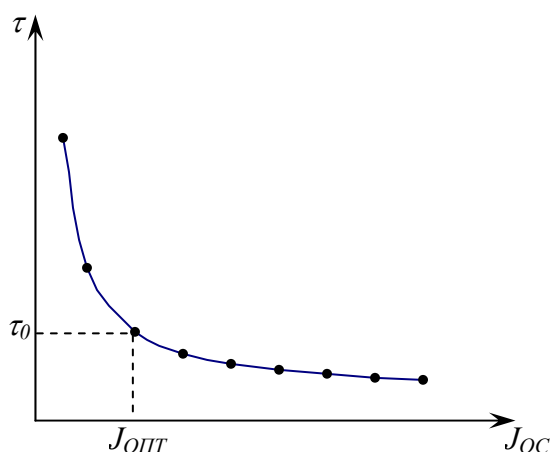


Рис. 22. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи ОС

С увеличением интенсивности подачи время тушения снижается до некоторого предельного значения  $\tau_0$ . Величина  $\tau_0$  определяется тепловой

инерционностью зоны химической реакции. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи называется «кривой тушения».

Для определения критической интенсивности ОС восходящая ветвь "кривой тушения" пересчитывается в виде линейной функции:  $\frac{1}{\tau} = f(J)$ , которая потом экстраполируется до пересечения с осью  $J$ .

Под "восходящей ветвью" кривой тушения понимают часть кривой зависимости времени тушения от интенсивности подачи ОС при  $J_{OC} \leq J_{опт}$  (рис. 23).

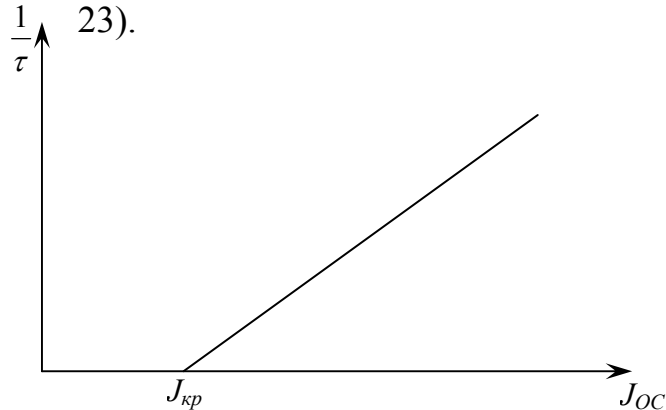


Рис. 23. Графический метод определения  $J_{кр}$

Точка пересечения полученной прямой с осью  $J_{OC}$  соответствует значению  $\frac{1}{\tau} = 0$  или  $\tau_T \rightarrow \infty$ . Согласно определению, полученное значение  $J_{OC}$  соответствует критической интенсивности подачи ОС.

Определение оптимальной интенсивности подачи ОС проводится согласно "кривой тушения" по удельному расходу ОС:

$$q_{уд} = \frac{G_{OC}}{F_n} = J_{OC} \cdot \tau_T.$$

Зависимость удельного расхода ОС от интенсивности подачи представлена на рис. 24.

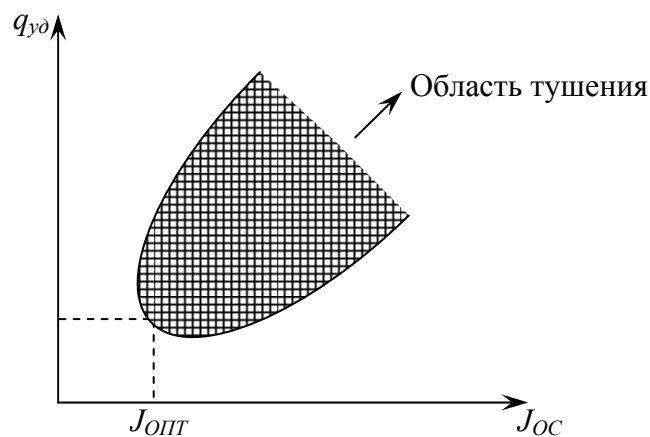


Рис. 24. Зависимость удельного расхода от интенсивности подачи ОС

Точка минимума на кривой соответствует значению оптимальной интенсивности подачи ОС, т.е.  $J_{опт}$ .

## 8.2. Аналитический метод определения критической и оптимальной интенсивности подачи ОС

При объёмном способе тушения (например, распыленной водой) за критическую интенсивность следует принимать интенсивность, обеспечивающую снижение температуры горения до температуры потухания, т.е.

$$J_{крит}^{об} = v_m^{ПП} \cdot \frac{Q_{от}^{пл}}{Q_{ох}}$$

где  $Q_{ох}$  – количество тепла, отводимое охлаждением;

$Q_{от}^{пл}$  – количество тепла, отводимое от пламени.

При тушении по поверхности конденсированной фазы (КФ) за критическую интенсивность принимают интенсивность, обеспечивающую отвод тепла, поступающего от факела пламени и идущего на разложение, а также на поддержание нагретого слоя:

$$J_{кр}^{нов} = v_m^{пред} \frac{(Q_{нпр} + C_{кф}(T_{нов} - T_H))}{Q_{ох}}$$

Решение этого уравнения относительно  $J_{ос} = J_{опт}$  даёт следующее выражение:

$$J_{опт}^{нов} = J_{кф} + \sqrt{q_{уд}^6 \cdot \frac{J_{кр}}{\tau_0}}$$

Прекращение горения заключается в создании условий, при которых самопроизвольное распространение пламени становится невозможным.

Температура потухания равна:

$$T_{пот}^0 = T_z \left( 1 - 3 \frac{RT_z^2}{E} \right),$$

где  $E$  – энергия активации, кДж/моль,  $E = 80-160$  кДж/моль;

$R$  – газовая постоянная, кДж/моль·К.

Для практических расчётов за температуру потухания могут быть приняты температуры горения предельных смесей на нижнем концентрационном пределе или в точке флегматизации, т.е. стехиометрические смеси содержат минимальную флегматизирующую концентрацию НГ (нейтрального газа). Тогда температуру потухания можно рассчитать:

$$T_{nom} = T_0 + \frac{Q}{\sum C_{p_{\text{III}}} V_{\text{III}i}^0 + C_p \left\{ \frac{100 - \varphi_H (V_s^0 + 1)}{\varphi_H} \right\}};$$

$$T_{nom} = T_0 + \frac{Q}{\sum C_{p_{\text{III}}} V_{\text{III}i}^0 + C_{p_0} \left\{ \frac{\varphi_\Phi (V_s^0 + 1)}{100 - \varphi_\Phi} \right\}}.$$

Из теплового баланса процесса горения следует, что прекращение горения может быть осуществлено при снижении температуры пламени до температуры потухания за счёт отвода некоторого количества тепла от зоны горения:

$$Q_{nom}^{nl} = \sum V_{\text{III}i} (C_{p_i} T_\Gamma - C_p T_{nom}).$$

Согласно УНИД (условия необходимые и достаточные) для тушения конденсированных фаз при поверхностном тушении необходимо:

- а) снижение температуры горения до температуры потухания;
- б) снижение температуры прогретого слоя до температуры вспышки или до нижнего температурного предела.

Удельный теоретический расход огнетушащего средства равен

$$q_{y\delta}^0 = q_{y\delta}^{nl} + q_{y\delta}^k = \frac{Q_{OT}^{nl}}{Q_{OX}^{nl}} + \frac{Q_{OT}^k}{Q_{OX}^k}.$$

Несмотря на новые разработки, отработанные системы предупреждения и ликвидации пожаров многие технологии борьбы с пожаром оказываются недостаточно эффективными, не существует единого средства или метода тушения, универсального для всех случаев.

Наиболее недорогие и широко известные вещества – пенные, ингибиторные, водяные имеют ряд недостатков.

Основной из них – вред, который причиняется технологическому оборудованию, а также то, что эти вещества не способны предотвратить повторные возгорания.

В этом плане наиболее эффективны огнетушащие системы на основе газовых огнетушащих веществ (ГОВТ). Огнетушащий эффект связан с расходом теплоты на нагрев разбавляющего газа и уменьшения теплового эффекта реакции. Снижение концентрации кислорода до 10 % оказывается достаточным для прекращения горения ТГМ, жидких и газообразных веществ. Недостатком является сложность установок и высокая стоимость азота. Сейчас разработан метод газоразделения на основе полимерных мембран для получения азота из воздуха. Воздух попадает в газоразделительный блок, где происходит выделение азота. Мембрана – это полое синтетическое волокно, наматываемое на катушку и находящееся в металлическом корпусе. Благодаря свойствам волокна, газы, входящие в состав воздуха, проникают сквозь мембрану с разной скоростью: кислород проникает в несколько раз быстрее, чем азот, а водород и  $\text{CO}_2$  – в десятки

раз быстрее. В результате поток подаваемого воздуха разделяется на два потока:

- а) остаточный (осушенный азот);
- б) воздух, обогащенный кислородом.

Остаточный поток подаётся потребителям, а воздух с кислородом выводится в атмосферу.

Достоинства метода: высокая надёжность, малые габариты, отсутствие эксплуатационных затрат. Всё это позволяет снизить себестоимость получаемого газа и размещать установки без специального помещения, а главное достоинство – создание мобильных, полностью автоматических систем.

Мембраны показали высокую устойчивость к перепадам температуры, тряскам, вибрации.

### 8.3. Сравнительная оценка эффективности тушения пожара

Понятие "эффективность работы" означает отношение результата работы к затратам на её выполнение. При выполнении работы "тушение пожара" в качестве результата можно принять потушенную площадь, а к затратам можно отнести абсолютный расход огнетушащих средств ( $q$ ) и время тушения ( $\tau_r$ ). Тогда показатель эффективности тушения будет равен

$$P_{\text{ЭГ}} = \frac{F_n}{q \cdot \tau},$$

если выразить  $q$  через интенсивность подачи ОС, тогда

$$P_{\text{ЭГ}} = \frac{F_n}{J \cdot F_n \cdot \tau_r \cdot \tau_r} = \frac{1}{J \cdot \tau_r^2}.$$

Фактическая интенсивность подачи огнетушащего средства равна

$$J = \frac{q_{\phi}}{F_n}.$$

#### Задача 1:

Определить в каком случае 1 или 2 эффективность тушения будет выше:

1. Площадь пожара  $50 \text{ м}^2$ , число стволов А – 1, стволов Б – 2, время тушения 10 минут.

2. Площадь пожара  $80 \text{ м}^2$ , число стволов А – 0, стволов Б – 3, время тушения – 7 минут.

#### Решение:

1. Для случая 1 рассчитать удельный расход воды:

$$q_{\text{уд}}^{\phi} = \frac{(7,4 + 3,7 \cdot 2) \cdot 10 \cdot 60}{50} = 177,6 \text{ л/м}^2.$$

Интенсивность подачи воды равна

$$J_1 = \frac{q_{\text{уд}}^{\phi}}{\tau_r} = \frac{177,6 \text{ л/м}^2}{600} = 0,296 \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Показатель эффективности тушения равен:

$$P_1 = \frac{1}{J \cdot \tau_T^2} = \frac{1}{0,296 \cdot 600^2} = 9,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{л} \cdot \text{с}}$$

2. Для случая 2 удельный расход огнетушащего вещества равен

$$q_{\text{уд}}^{\phi} = \frac{3,7 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 60}{80} = 58,3 \text{ л/м}^2.$$

Интенсивность подачи огнетушащего средства равна

$$J = \frac{q_{\text{уд}}^{\phi}}{\tau_T} = \frac{58,3}{420} = 0,139 \text{ л/м}^2 \cdot \text{с}.$$

Показатель эффективности тушения равен

$$P_2 = \frac{1}{J \cdot J_T^2} = \frac{1}{0,139 \cdot 420^2} = \frac{1}{70050} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{л} \cdot \text{с}.$$

3. Сравнить эффективность тушения в обоих случаях:

В первом случае эффективность тушения будет выше, т.к.  $9,4 \cdot 10^{-5} > 1,4 \cdot 10^{-5}$

Ответ:

В первом случае эффективность тушения выше..

#### 8.4. Комбинированные средства тушения

Для тушения наиболее сложных пожаров, если недопустимо применение обычных средств тушения, используют комбинированные средства.

Существуют два способа применения комбинированных средств:

1) Совмещение различных компонентов в одном, т.е. создание огнетушащих средств сложного рецептурного состава.

2) Раздельная (одновременная или последовательная) подача различных огнетушащих средств (ОС) в зону горения.

Примером огнетушащих средств сложного рецептурного состава являются некоторые виды порошковых средств тушения или пенные средства. Комбинированный способ подачи – это подача порошка ВСЕ-SV, а потом пены или пены, а потом воды.

Простейшее комбинированное ОС – это химическая пена. При разрушении химической пены выделяется углекислота, которая распадается на  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , т.е. сначала механизм прекращения горения – изоляция, а потом – по типу разбавления зоны горения.

Химическая пена получается мокрым способом, когда растворы хранятся раздельно и смешиваются при подаче (один из растворов щелочной, другой кислотный). В состав щелочного раствора входят карбонаты, бикарбонаты, пенообразователь, ПАВ. Кислотный раствор содержит сульфат аммония.

И сухим способом, когда пенообразующий порошок состоит из щелочных и кислотных солей и в пеногенераторе смешивается с водой.

Огнетушащую эффективность ВМП можно повысить путем оптимизации её подачи: сначала подавать пену низкой кратности, чтобы происходило максимальное охлаждение прогретого слоя, затем подавать пену более высокой кратности, чтобы обеспечить изолирующий эффект.

Другой способ комбинирования огнетушащих средств – получение водно-газовых пен, в которых ячейки наполняются газом:  $N_2$ ,  $CO_2$ , фреоном.

Кроме того, введение в пену газов приводит к повышению огнестойкости пен. Газ – наполнитель после разрушения пены попадает в зону горения и снижает интенсивность тепловыделения.

Недостатком комбинированных пен является их высокая стоимость и необходимость дополнительного оборудования для подачи.

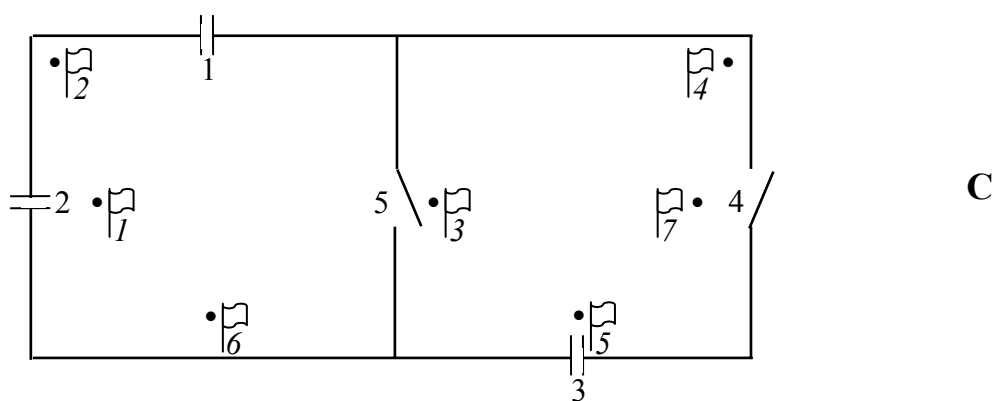
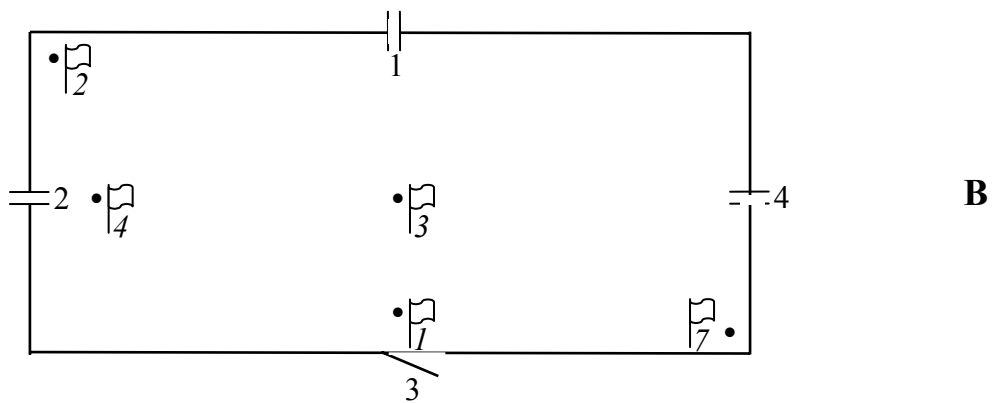
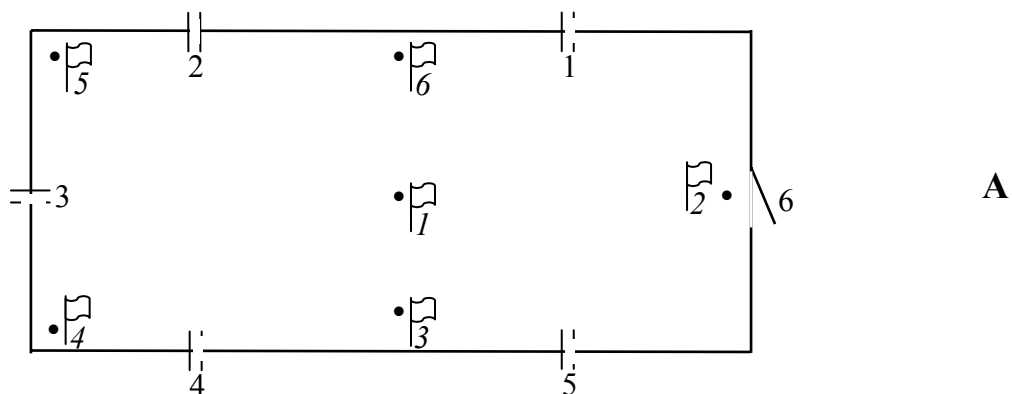
Создаются комбинированные порошковые средства тушения. Весьма эффективны порошковые составы типа СИ, которые представляют собой силикагель, насыщенный галоидоуглеводородами. Механизм прекращения горения: изоляция и ингибирование за счёт выделяющихся галогеноводородов. Так как силикагель является достаточно дефицитным, его заменили перлитовым песком. Эффективны порошки на основе перлитового песка и фреона. Недостатком является то, что могут возникнуть повторные воспламенения. При последовательной подаче порошка, а затем пены предотвращается повторное воспламенение.

Для увеличения эффективности пены на поверхность жидкости наносят слой негорючего вещества с плотностью меньше плотности жидкости. Получается, что поверхность пены и жидкости разделены между собой, в результате пена разрушается менее интенсивно. В качестве такого разделяющего вещества используют пламилон – тонкодисперсный порошок, который свободно плавает по поверхности жидкости.

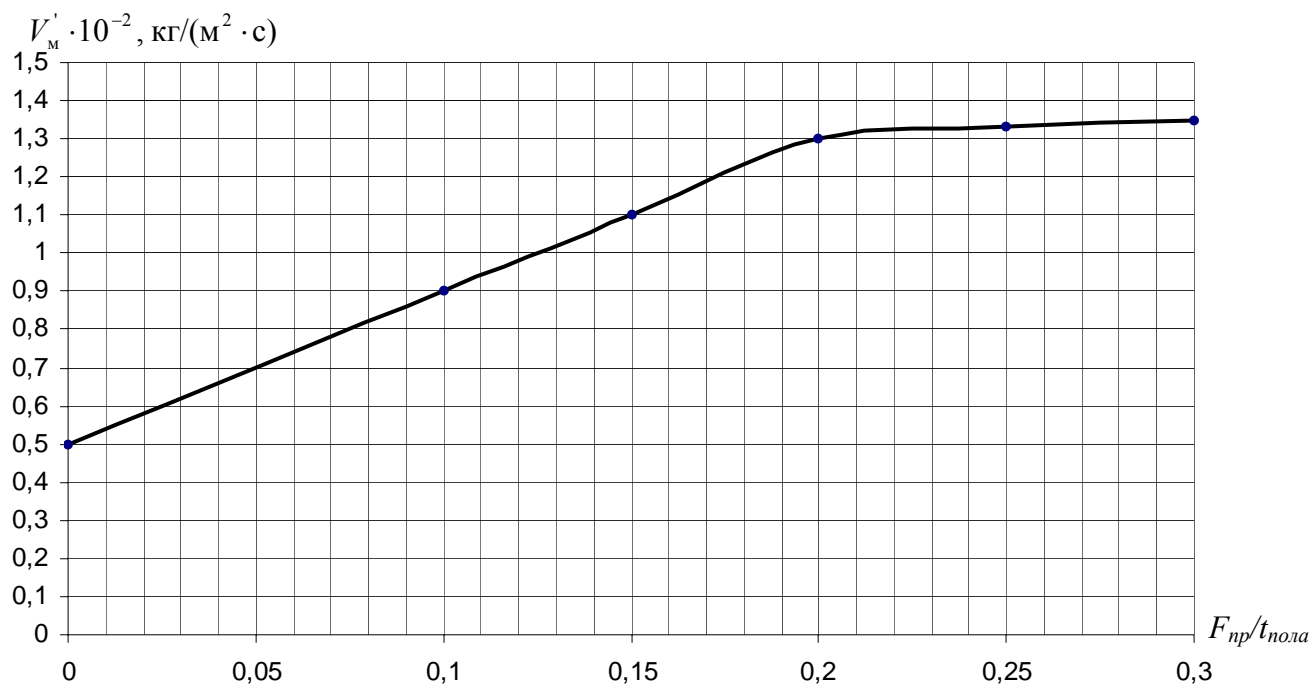
Иногда при тушении резервуаров с нефтепродуктами в зону горения подают сначала тонкораспылённую воду, а затем пену.



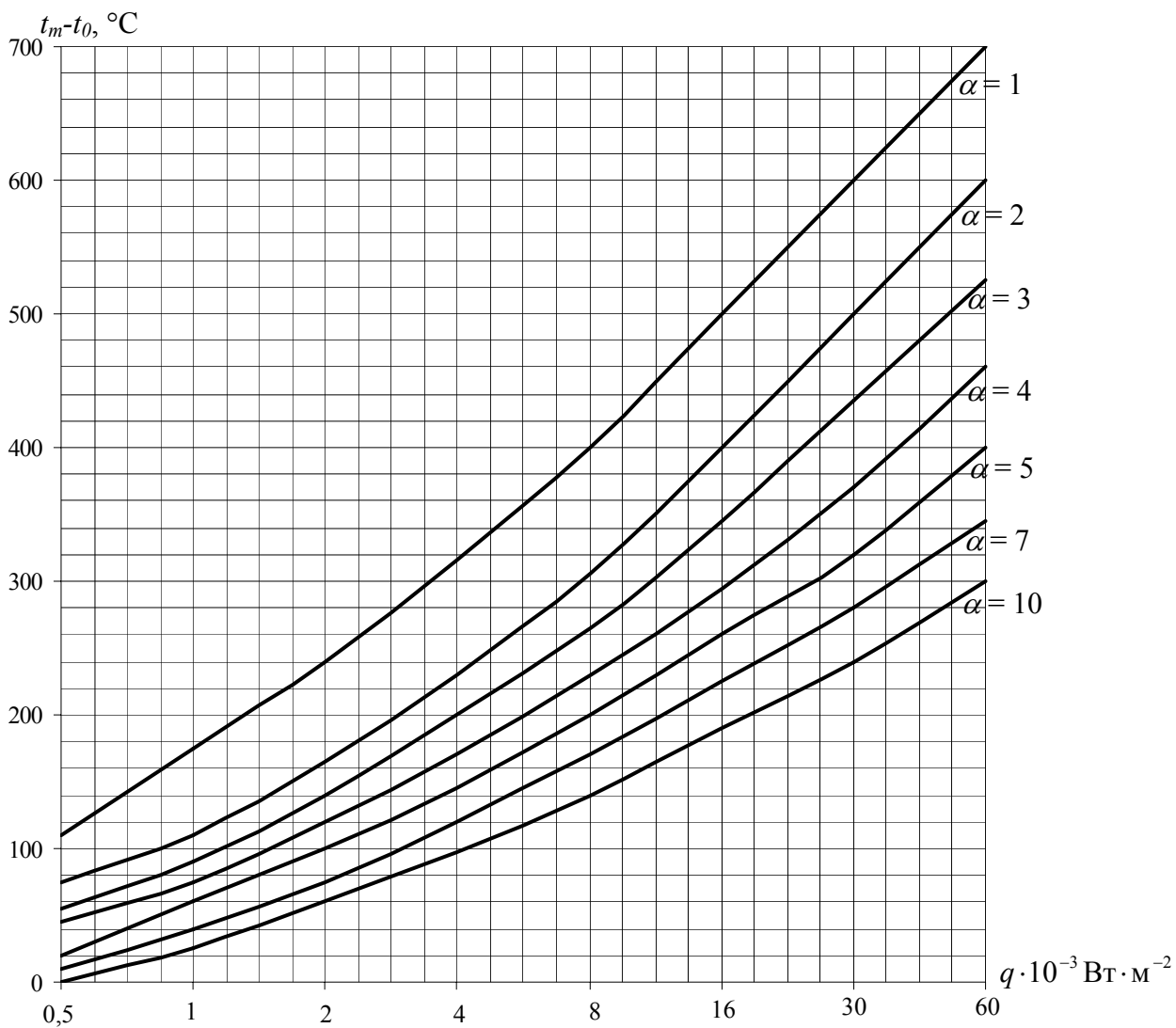
**Планировка помещения и место возникновения пожара**



**Зависимость приведенной скорости выгорания древесины от относительной площади проемов на внутреннем пожаре**



**Номограмма для определения температуры внутреннего пожара**



**Массовая и линейная скорость выгорания некоторых веществ**

№	Горючие жидкости	Скорость выгорания	
		массовая, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	линейная, мм/с
1	2	3	4
1	Ацетон	0,047	0,055
2	Бензол	0,038	0,052
3	Бензин	0,045 – 0,053	0,063 – 0,075
4	Бутиловый спирт	0,0135	0,0186
5	Диэтиловый эфир	0,06	0,083
6	Изопентан	0,105	0,167
7	Нефть	0,02	0,0267
8	Мазут	0,035	0,036
9	Керосин	0,0438	0,06
10	Сероуглерод	0,036	0,0284
11	Этиловый спирт	0,0266 – 0,03334	0,0334 – 0,042

№	Горючие твердые материалы	Приведённая массовая скорость выгорания, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1	2	3
1	Бумага разрыхлённая	0,008
2	Древесина в изданиях (W=8-10%)	0,014
3	Калий металлический	–
4	Натрий металлический	–
5	Карболитовые изделия	0,0063
6	Органическое стекло	0,0143
7	Полистирол	0,0143
8	Пиломатериалы в штабели на открытой площадке	0,112
9	Резино-технические изделия	0,0112
10	Текстолит	0,0067
11	Каучук натуральный	0,0113
12	Каучук синтетический	0,0088
13	Кинопленка целлулоидная	1,17
14	Книги на деревянных стеллажах	0,0055
15	Торфоплиты (W=9-12%)	–
16	Торф в караванах (W=40%)	0,003
17	Хлопок разрыхлённый	0,004
18	Штапельное волокно разрыхлённое	0,0067
19	Этрол ацетилцеллюлозный	0,015
20	Фенопласты	0,0058

## Теплоты образования и сгорания некоторых веществ

№	Вещество	Теплота образования, кДж/моль	Теплота сгорания, кДж/моль
1	2	3	4
1	Альдегид муравьиный (ж) уксусный (ж)	121,1 166,3	561,5 1173,2
2	Аммиак (газ)	46,1	384,2
3	Анилин (ж)	29,7	3484,0
4	Антрацен (тв)	-101,4	7102,0
5	Ацетилен (газ)	-224,6	1307,3
6	Ацетон (ж)	248,1	1789,1
7	Бензол (ж)	-34,8	3282,4
8	Бутадиен-1,3	-104,3	2547,9
9	н-Бутан (газ)	132,4	2882,3
10	н-Бутан (ж)	153,8	2863,0
11	Бутен-1 (газ)	6,3	2723,9
12	Винилхлорид (газ)	-37,7	1259,9
13	Винилхлорид (ж)	-17,2	1239,4
14	Вода (ж)	286,6	–
15	Вода (газ)	242,2	–
16	н-Гексан	167,2	4150,6
17	н-Гептан	239,7	4814,3
18	Глицерин	675,4	1658,8
19	Двуокись серы углерода	297,5 396,6	– –
20	Диоксон (ж)	375,4	2354,8
21	Дифенил (тв)	-80,4	6258,2
22	Изобутан (ж)	159,2	2857,6
23	Кислота бензойная (тв) масляная муравьиная (ж) олеиновая пропионовая (ж) стеариновая (тв) уксусная (ж)	394,3 525,0 419,0 625,1 458,4 937,7 485,6	3233,8 2178,8 263,1 11183,1 1589,3 11304,6 942,7
24	Метан	75,0	891,5
25	Мочевина	–	636,9
26	Нафталин	-62,8	5161,2
27	Нитроэтан (ж)	144,1	1364,3

1	2	3	4
28	Окись углерода	112,7	283,2
29	н-Пентан (ж)	184,4	3515,0
30	Пропан (газ)	109,4	2223,2
31	Пропан (ж)	125,3	2209,0
32	Сероводород	201,1	338,5
33	Сероуглерод (ж)	-88,0	979,6
34	Спирт		
	н-амиловый	359,1	3297,5
	н-бутиловый	341,5	2677,4
	н-гексиловый	385,1	3996,8
	метиловый (ж)	239,0	726,6
	пропиловый (ж)	307,1	2019,6
	этиловый (ж)	278,2	1374,3
35	Теофен (ж)	-81,7	2536,2
36	Тетралин	81,7	5597,4
37	Толуол (ж)	4,19	3921,8
38	Фенол (тв)	171,4	3067,1
39	Этан (газ)	88,4	1562,0
40	Этилбензол (ж)	33,1	4567,5
41	Этилен	-48,6	1391,1
42	Этиленгликоль (ж)	455,4	1152,2
43	Эфир		
	диметиловый (ж)	207,8	1443,9
	диэтиловый (ж)	283,2	2730,6
	уксусноамиловый	594,7	4189,8
	уксуснобутиловый (ж)	542,2	3551,4
	уксуснометиловый (ж)	411,9	1635,8
	уксуснопропиловый (ж)	513,7	2899,1
	уксусноэтиловый (ж)	480,2	2256,3

**Объём воздуха и выделившихся продуктов горения  
при сгорании килограмма вещества**

№	Горючее вещество, материал	Объём воздуха для полного сгорания $V_0^e$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	Объём продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$
1	2	3	4
1	Амилацетат	7,8	8,56
2	Амиловый спирт	9,1	10
3	Анилин	8,9	9,34
4	Ацетилен	10,25	10,7
5	Ацетон	7,35	8,14
6	Бензин	11,6	12,35
7	Бензол	10,25	10,7
8	Битум	9,45	10,39
9	Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	3,95	4,65
10	Бутан	11,94	12,91
11	Бутиловый спирт	8,64	9,52
12	Древесина при влажности: 10% 20% 30%	4,2 3,74 3,54	4,86 4,42 3,99
13	Капролактан	7,76	8,54
14	Каучук натуральный	10	10,76
15	Каучук синтетический	10,16	10,82
16	Керосин	11,36	12,29
17	Киноплёнка нитроцеллюлозная	3,62	4,32
18	Киноплёнка триацетатная	4,34	4,97
19	Мазут	11	11,86
20	Метан	13,32	14,72
21	Нефть	11,8	11,86
22	Полистирол	10,25	10,68
23	Полиэтилен	11,42	12,22
24	Пенополиуретан	6	6,55
25	Резина	9,9	10,5
26	Толуол	10,46	11,94
27	Торф при влажности 10%	4,54	5,14
28	Хлопок	3,7	4,5
29	Масло соляровое	11,5	11,95

### Низшая теплота сгорания

№	Горючее вещество, материал	Низшая теплота сгорания $Q_H^P$ , кДж/кг
1	2	3
1	Амилацетат	33553,5
2	Амиловый спирт	39046,6
3	Анилин	34777
4	Ацетилен	56000
5	Ацетон	30939
6	Бензин	43576
7	Бензол	40807
8	Битум	40807
9	Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	13408
10	Бутан	118300
11	Бутиловый спирт	36144,9
12	Древесина при влажности: 10% 20% 30%	16500 14400 12200
13	Капролактам	29749
14	Каучук натуральный	44833
15	Каучук синтетический	45252
16	Керосин	43157
17	Кинопленка нитроцеллюлозная	15084
18	Кинопленка триацетатная	18779,6
19	Мазут	41900
20	Метан	35800
21	Нефть	46090
22	Полистирол	38967
23	Полиэтилен	47137,5
24	Пенополиуретан	24302
25	Резина	33520
26	Толуол	42355,4
27	Торф при влажности 19%	16613,3
28	Хлопок	15700
29	Масло соляровое	43069

Приложение 9

№	Наименование предметов, изделий	Размеры изделий	Масса изделий	Коэффициент
---	---------------------------------	-----------------	---------------	-------------



		и предметов, м	и предметов, кг	поверхности горения
1	2	3	4	5
1	Верстак столярный	1,5x0,8x0,1	54	4
2	Декорации из ткани	6,5x10	28	1
3	Декорации из дерева	6x4x0,05	180	163,3
4	Декорации из дерева	6x5x0,05	225	203,7
5	Декорации из дерева	5x4x0,05	150	163,5
6	Декорации из дерева	4x2x0,05	60	83
7	Диван-кровать	2x0,6x1,3	54	5,7
8	Диван	2x0,8x0,9	65	6,2
9	Журналы форматом 70x108 1716 на стеллажах без учета поверхности полки	1x0,16x0,26	28	2,9 – 4,8
10	Журнал форматом 84x108 178 при тех же условиях	1x0,2x0,27	23	2,6 – 4,3
11	Журнал форматом 84x108 1716 при тех же условиях	1x0,2x0,255	39	2,5 – 4,1
12	Журнал форматом 70x108 178 при тех же условиях	1x0,24x0,315	49	2,6 – 4,2
13	Журнал форматом 60x80 1/8 при тех же условиях	1x0,215x0,29	40	2,6 – 4,3
14	Книги форматом 70x180 1/6 на стеллажах без учета поверхности полки	1x0,18x0,26	30	2,7 – 4,4
15	Книги форматом 60x90 1/16 при тех же условиях	1x0,15x0,22	18	2,6 – 4,3
16	Книги форматом 84x108 1/32 при тех же условиях	1x0,135x0,205	16	2,7 – 4,6
17	Книги форматом 60x90 1/32 при тех же условиях	1x0,105x0,135	10	2,4 – 3,9
18	Книги форматом 70x108 1/32 при тех же условиях	1x0,125x0,165	14	2,5 – 4
19	Книги форматом 70x90 1/32 при тех же условиях	1x0,11x0,17	11	2,7 – 4,4
20	Кресло деревянное жесткое	0,45x0,4x0,85	6	4,6
21	Кресло деревянное полумягкое	0,45x0,45x0,75	6	4,3
22	Кресло мягкое	0,45x0,45x0,75	8	8,4
23	Кровать полуторная деревянная	0,94x1,44x0,6	54	4,9
24	Кровать детская деревянная	0,65x1,2x0,8	16	6,7
1	2	3	4	5
25	Коробки картонные	разных	0,2 – 0,35	2,2 – 3,8

		размеров		
26	Полка настенная остекленная для книг	0,6x0,25x0,57	16	3,8
27	Пианино С-6	1,45x0,4x1,4	200	4,8
28	Портьеры из льняной ткани (проекция на вертикальную плоскость)	1,4x2,8	3,6	1,0
29	Сервант	0,43x1,5x1,34	31	6,9
30	Стеллаж для профилей и папок	0,1x0,45x2,02	75	26,2
31	Стеллаж для инструмента с полками и ящиками	1,86x0,45x2	85	16,6
32	Стеллаж многоярусных для книг и журналов	1x0,25x3,2	144	7,8
33	Стол двухтумбовый из фанеры	1,3x0,65x0,75	30	5,4
34	Стол двухтумбовый из досок	1,4x0,7x0,75	52	4,8
35	Стол однотоумбовый	1x0,65x0,77	32	5,0 – 6,0
36	Стол канцелярский	1x0,65x0,75	18	3,7
37	Сто приставной	0,8x0,55x0,75	10	4,1
38	Сто журнальный	0,8x0,8x0,6	6	2,0
39	Стол лекционный	1,25x0,5x0,75	18	6,0
40	Стол чертёжный	1x0,75x0,9	14	2,1
41	Стол раздвижной полированный	1,5x1,х0,75	15	3,0
42	Стол кухонный закрытый	0,78x0,45x0,75	14	6,2
43	Стол-верстак	1,36x0,85x1,32	50	5,4
44	Стол лабораторный с полкой	0,7x2,6x0,9	120	4,5
45	Стул жесткий деревянный	0,4x0,4x0,82	4	4,5
46	Стул полумягкий деревянный	0,45x0,4x0,85	5	4,6
47	Стул полумягкий металлический	0,45x0,4x0,65	5	4,2
48	Стул детский	0,3x0,26x0,33	1,5	3,6
49	Софа собранная	0,9x1,9x0,83	65	3,3
50	Сфера разобранная	1,9x1,3x0,43	65	1,6
51	Телевизор «Рубин-106»	0,7x0,25x0,5	3,6	4,1
52	Тумбочка прикроватная	0,506x0,375x0,715	10	8,6
53	Тумбочка прикроватная	0,35x0,35x0,45	6	6,1
54	Тумбочка лабораторная с крышкой	0,45x0,85x0,9	15	8,1

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

55	Холодильник «Минск-4»	0,47x0,5x1,06	5,8	7,6
56	Чемоданы	разных размеров	1,2-3,5	2,5 – 2,7
57	Шкаф картотечный на 54 ящика	0,73x0,456x1,7 3	120	10,5
58	Шкаф платяной	1,2x0,45x1,85	45	8,1
59	Шкаф книжный	1,15x0,35x1,5	23	8,9
60	Шкаф вытяжной лабораторный	2,38x0,85x3,2	900	7,4
61	Шкаф специальный для химических реактивов	1,16x0,5x2	55	8,4
62	Шкаф специальный для приборов	1,5x0,5x2,5	100	10,3
63	Шкаф вытяжной для лабораторный раковины	0,68x0,85x3,2	350	10,4
64	Ящик-тара деревянный	2,6x2x1,2	137	3,1
65	Ящик-тара деревянный	2x1,4x1,2	124	3,9
66	Ящик-тара деревянный	2,4x1,5x0,5	100	2,0
67	Ящик-тара деревянный	0,6x0,8x0,4	18,5	3,3
68	Ящик-тара картонный	разных размеров	0,3-2,0	3,3-7
69	Ящик тара фанерный	0,39x0,27x0,21	1,5	3,6

**ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Классификация пожаров. Основные параметры пожаров.
2. Параметры пожаров газовых и газонефтяных фонтанов. Зона отрыва пламени, оценка дебета газового фонтана.
3. Зависимость массовой скорости выгорания жидкости от диаметра резервуара, уровня жидкости, скорости ветра.
4. Прогрев жидкости при горении по глубине. Поле температур. Механизм образования гомотермического слоя.
5. Явления вскипания и выброса жидкостей при горении в резервуарах. Их механизм и внешние признаки.
6. Поле температур в твердом горючем материале. Термически тонкие и термически толстые образцы.
7. Распространение пламени по поверхности ТГМ на открытых пожарах. Зависимость скорости распространения пламени от различных факторов.
8. Основные процессы и явления на внутренних пожарах. Их взаимосвязь.
9. Механизм и параметры газообмена при пожаре в помещении.
10. Механизм формирования плоскости равных давлений. Изменение ее высоты во время пожара.
11. Основные стадии внутренних пожаров. Их характеристика.
12. Тепловой баланс внутреннего пожара. Основные составляющие. Их изменение во время свободного развития пожара.
13. Взаимосвязь процессов тепло- и газообмена на внутренних пожарах. Пожары, регулируемые вентиляцией и пожары, регулируемые нагрузкой.
14. Влияние параметра вентиляции на максимальную температуру внутреннего пожара.
15. Влияние параметра вентиляции на массовую скорость выгорания пожарной нагрузки.
16. Объемная вспышка при пожарах в открытых и закрытых помещениях. Ее механизм; условия, при которых она происходит.
17. Особенности горения при пожарах в помещениях с полностью закрытыми проемами.
18. Основы тепловой теории прекращения горения. Температура потухания, пути и методы ее достижения.
19. Способы прекращения горения на пожаре в зависимости от вида горючего материала и режима горения с позиций тепловой теории.
20. Анализ механизма действия негорючих газов в зоне горения с позиций тепловой теории.
21. Анализ механизма действия химически активных ингибиторов в зоне горения с позиций тепловой теории.
22. Механизмы действия пен при тушении жидкостей.
23. Механизмы действия пен при тушении ТГМ.
24. Механизмы действия огнетушащих порошков при подаче их в зону горения и на поверхность горючего.
25. Анализ механизма действия воды на процесс горения при подаче в зону горения и на поверхность горючего материала.
26. Классификация огнетушащих веществ по доминирующему механизму действия на процесс горения. Принцип выбора огнетушащих веществ для тушения пожаров.

27. Негорючие газы, применяемые для пожаротушения. Огнетушащие концентрации. Области применения.
28. Химически активные ингибиторы, их номенклатура, огнетушащие концентрации, области применения.
29. Виды пен и способы их получения. Основные параметры пен. Области применения.
30. Классификация пенообразователей. Их основные свойства. Области применения.
31. Основные физико-химические свойства воды как огнетушащего вещества. Области и способы применения.
32. Виды и рецептура огнетушащих порошков. Эксплуатационные особенности. Области применения.
33. Огнетушащие аэрозоли. Механизмы огнетушащего действия. Области и способы применения.
34. Основные параметры прекращения горения на пожарах. Их физический смысл.
35. Критическая и оптимальная интенсивности подачи негорючих газов при тушении методом затопления. Физический смысл, зависимость от различных факторов.
36. Критическая и оптимальная интенсивности подачи пены. Физический смысл, зависимость от различных факторов.
37. Критическая и оптимальная интенсивности подачи воды. Физический смысл, зависимость от различных факторов.
38. Коэффициент использования воды на пожаре. Зависимость от различных факторов. Способы повышения.

## **ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

1. Определить коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки, состоящей из дивана размером  $2 \times 0,8 \times 0,9$  м массой 60 кг, серванта с размерами  $0,40 \times 1,5 \times 1,34$  м массой 30 кг и много ярусного стеллажа для книг и журналов с размерами  $1 \times 0,25 \times 3,2$  м массой 150 кг. Все изделия находятся в помещении с размерами  $5 \times 8 \times 3$  м.

2. Рассчитать площадь поверхности горения деревянного кресла с размерами  $0,45 \times 0,45 \times 0,75$  м, если коэффициент поверхности горения равен 4,3. Кресло находится в комнате, размеры которой равны  $4 \times 4 \times 2$  м.

3. Рассчитать массовую и тепловую пожарную нагрузку столярной мастерской размерами  $9 \times 121$  м. Пожарная нагрузка состоит из деревянного дощатого пола (толщина досок 0,03 м), двух столярных верстаков с размерами  $1,5 \times 0,8 \times 0,1$  м и массой 62 кг.

4. Рассчитать коэффициент поверхности горения пожарной нагрузки помещения размером  $6 \times 7$  м с полом, покрытым линолеумом. В помещении находятся 3 стула, шкаф, два стеллажа. Размеры стульев  $0,4 \times 0,4 \times 0,8$  м, шкафа –  $1,2 \times 0,45 \times 1,25$  м, стеллажа –  $1,86 \times 0,45 \times 2,0$  м. Коэффициенты поверхности горения равны: стул – 45, шкаф – 8,1, стеллаж – 16,6.

5. Рассчитать время окончания начальной стадии пожара в помещении размерами  $4 \times 7 \times 3$  м, если пожарная нагрузка книги, коэффициент поверхности горения равен 3,4, приведенная массовая скорость выгорания равна  $0,017 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2,4$ , линейная скорость распространения пожара равна  $0,8$  м/мин.

6. Известно, что продолжительность начальной стадии пожара равна 6 мин. В помещении размером  $10 \times 7 \times 4$  м горит бумага в рулонах, массовая скорость выгорания равна  $0,004 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ , коэффициент избытка воздуха равен 3,7. Пожар распространяется со скоростью  $0,6$  м/мин. Определить линейную скорость распространения пожара.

7. Определить скорость распространения пожара в помещении размером  $5 \times 5$  м, если пожар возник у торцевой стены, на 12 минуте площадь пожара составляла 70 % от площади помещения.

8. Рассчитать линейную скорость распространения пламени, если через 10 минут после начала пожара фронт пламени перенести на 8 м.

9. Рассчитать линейную скорость распространения пламени в помещении размером  $12 \times 8 \times 4$  м, если через 15 минут после начала площадь пожара была равна  $50 \text{ м}^2$ . Пожара возник у середины боковой стены.

## 10-19. Рассчитать площадь пожара

№	Вариант планировки	Размеры помещения, м			Место возникновения пожара	Линейная скорость распространения пожара, м/мин	Время развития пожара, мин	Предел огнестойкости, дверей, ч
		а	в	h				
10	А	10	8	3,5	3	0,5	14	0
11	Б	7	5	3,0	1	1,1	21	0,2
12	А	8	5	3,0	5	1,2	20	0,2
13	С	7,5	4	3,5	4	0,6	18	0,3
14	С	7	4	2,5	1	0,8	25	0,1
15	А	12	7	4,0	2	0,9	22	0
16	Б	9	4	2,8	2	1,0	20	0,4
17	А	8	6	4,0	4	1,5	15	0,6
18	Б	15	10	4,0	3	0,7	12	0,5
19	С	10	6	4,0	5	0,6	16	0,3

**20–29.** Рассчитать время, в течение которого огнём будет охвачено всё помещение

№	Вариант планировки	Размеры помещения, м			Место возникновения пожара	Линейная скорость распространения пламени, м/мин	Предел огнестойкости дверей, ч
		а	в	h			
20	С	15	10	3	5	1,5	0
21	С	18	12	4	2	0,6	0
22	С	16	11	4,5	6	0,8	0,15
23	А	15	9	2,5	1	1,1	0,15
24	А	19	10	4	3	1,2	0
25	А	21	15	3	2	0,8	0,3
26	Б	25	10	4	3	1,0	0,2
27	С	6	5	2,5	3	0,7	0,2
28	А	8	7	3,5	6	1,3	0,2
29	Б	10	10	3	2	1,0	0,2

30. Рассчитать время окончания начальной стадии пожара в помещении размерами 4x7x3 м, если пожарная нагрузка книги, коэффициент поверхности горения равен 3,4, приведенная массовая скорость выгорания равна 0,017 кг/м<sup>2</sup>·с, коэффициент избытка воздуха α=2,4, линейная скорость распространения пожара равна 0,8 м/мин.

31. Известно, что продолжительность начальной стадии пожара равна 6 мин. В помещении размером 10x7x4 м горит бумага в рулонах, массовая скорость выгорания равна 0,004 кг/м<sup>2</sup>·с, коэффициент избытка воздуха равен 3,7. Пожар распространяется со скоростью 0,6 м/мин. Определить линейную скорость распространения пожара.

32. Определить скорость распространения пожара в помещении размером 5x5 м, если пожар возник у торцевой стены, на 12 минуте площадь пожара составляла 70 % от площади помещения.

33. Рассчитать линейную скорость распространения пламени, если через 10 минут после начала пожара фронт пламени перенести на 8 м.

34. Рассчитать линейную скорость распространения пламени в помещении размером 12х8х4 м, если через 15 минут после начала площадь пожара была равна 50 м<sup>2</sup>. Пожара возник у середины боковой стены.

**35–39.** Определить режим пожара (ПРН или ПРВ)

№	Вид горючего вещества	Количество горючего вещества, кг	Размер проёмов, м	Число проёмов, шт	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Размеры помещения, м
35	Глицерин	800	0,7х1,5	5	16120	5х4х3
36	Нафталин	170	0,8х0,8	7	39530	7х3х3
37	Нитроэтан	90	1,2х1,5	2	18187	10х5х4
38	Пропан	250	0,8х2,1	2	46454	8х6х3
39	Сероуглерод	310	0,9х1,3	3	14020	12х10х4
40	Винилхлорид	420	1,5х1,4	3	18694	9х8х3
41	Н-гексан	370	0,9х0,9	5	45198	10х4х3
42	Сероводород	240	0,8х1,9	4	9227	12х4х4
43	Аммиак	350	1,2х1,3	3	18588	6х5х3
44	Анилин	290	1,2х1,4	2	32430	5х5х3

**45–54.** Определить, как может измениться среднеобъёмная температура в помещении при увеличении притока воздуха:

№	Вид горючего вещества	Количество горючего вещества, кг	Размер проёмов, м	Число проёмов, шт	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Размеры помещения, м
45	ацетон	50	1,5х1,5	2	28890	10х6х3
46	бензол	100	1,3х1,3	3	38520	15х10х4
47	бумага	700	1,4х1,5	2	13400	8х7х3
48	каучук	150	1,8х1,8	2	43890	9х8х4
49	резина	120	1,3х1,5	3	33520	15х11х3
50	полиэтилен	200	0,5х1,0	4	47140	9х6х4
51	волокно	300	1,5х1,7	3	13800	7х7х3
52	книги	100	1,5х1,5	5	13400	10х3х3
53	изопентан	180	1,3х1,4	4	45220	15х6х4
54	толуол	100	1,7х2,0	1	41030	11х11х4

**55–64.** Рассчитать температуру пожара на заданный момент времени: горючее вещество, аналогично древесине



№	Вариант планировки	Размеры помещения, м			Место возникновения пожара	Размер оконных проёмов, м	Размер дверного проёма, м	Линейная скорость пожара, м/мин	Предел огнестойкости дверей, ч	Время развития пожара, мин
		15	8	4						
55	С	15	8	4	3	1,5x1,5	0,9x2,2	1,3	0,25	22
56	С	22	11	3,5	7	2x1,6	0,95x2,1	1,5	0,3	18
57	С	20	10	4	5	1,7x1,4	1x2,2	0,8	0	24
58	А	16	14	3	5	1,5x1,3	0,85x2	0,7	0,25	30
59	Б	15	7	4,5	3	1,6x1,5	0,9x2	2,0	0,2	33
60	С	14	9	3	1	1,7x1,5	1x2	0,9	0,15	27
61	Б	13	8	3	5	1,8x1,5	0,95x2	0,4	0,3	18
62	А	12	6	4	4	1,8x1,4	1x2,05	0,5	0,1	21
63	А	10	4	3	2	2x1,4	1,1x2,1	0,6	0,2	20
64	А	12	7	3	6	1,9x1,6	1x2,2	1,2	0,4	12

**65–69.** Рассчитать значение среднеобъёмной температуры в помещении на заданный момент времени:

№	Горючее вещество	Размер помещения, м	Размер проёмов, м	Количество горючего вещества, кг	Количество проёмов, шт	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Время развития пожара, мин	$V_g^0$ , м <sup>3</sup> /кг
65	Бензин	9x8x3,5	0,9x2,1	600	2	41870	20	11,60
66	Диэтиловый спирт	7x5x3,5	1,6x1,5	120	2	33500	22	10,36
67	Керосин	8x5x3,0	1,8x1,4	300	1	43540	24	11,36
68	Турбинное масло	7x4x3,2	2x1,4	500	2	41870	25	11,50
69	Киноплёнка триацетатная	9x4x3,1	0,95x2	600	3	18800	19	4,34
70	Органическое стекло	8x6x4	1x2,2	500	1	27670	26	9,20
71	Текстолит	15x8x4,5	0,9x2	140	4	29900	30	8,90
72	Древесина	10x6x4,2	0,85x2	900	2	16700	24	3,90
73	Резина	8x6x3,5	0,9x2	70	2	33520	10	9,90
74	Ацетон	9x4x3,1	1x2,2	400	1	28890	15	7,35

**75–94.** Определить количество огнетушителей, необходимых для тушения разлива жидкости:

№	Горючая жидкость	Площадь пожара, м <sup>2</sup>	Огнетушащее вещество	Огнетушащая концентрация	Производительность огнетушителя
75	Керосин	25	Углекислый газ	25 %	0,46 м <sup>3</sup> /с
76	Бензин	30	Порошок	0,3 кг/м <sup>3</sup>	0,5 кг/с
77	Бензол	15	Углекислый газ	30	0,22 м <sup>3</sup> /с
78	Ацетон	10	Азот	35 %	0,6 м <sup>3</sup> /с
79	Бутиловый спирт	8	Азот	37	0,5 м <sup>3</sup> /с
80	Сероуглерод	7	Порошок	0,3 кг/м <sup>3</sup>	0,5 кг/с
81	Глицерин	12	Углекислый газ	27 %	0,40 м <sup>3</sup> /с
82	Бутиловый спирт	18	Азот	30 %	0,5 м <sup>3</sup> /с
83	Толуол	35	Азот	35 %	0,7 м <sup>3</sup> /с
84	Метиловый спирт	47	Азот	33 %	0,5 м <sup>3</sup> /с
85	Октан	29	Азот	35 %	0,5 м <sup>3</sup> /с
86	Стирол	100	Азот	30 %	0,45 м <sup>3</sup> /с
87	Ацетон	74	Азот	35 %	0,4 м <sup>3</sup> /с
88	Соляровое масло	25	Порошок	0,4 кг/м <sup>3</sup>	0,5 кг/с
89	Дизельное масло	94	Порошок	0,35 кг/м <sup>3</sup>	0,47 кг/с
90	Диэтиловый эфир	60	Азот	35 %	0,6 м <sup>3</sup> /с
91	Бензол	55	Углекислый газ	28 %	0,44 м <sup>3</sup> /с
92	Бензин	40	Порошок	0,5 кг/м <sup>3</sup>	0,3 кг/с
93	Ацетон	32	Азот	37 %	0,4 м <sup>3</sup> /с
94	Керосин	80	Углекислый газ	28 %	0,45 м <sup>3</sup> /с

**95–114.** Определить площадь тушения одним огнетушителем разлива горючей жидкости:

№	Горючая жидкость	Огнетушащее вещество	Огнетушащая концентрация	Производительность огнетушителя
95	Сероуглерод	Порошок	0,4 кг/м <sup>3</sup>	0,46 кг/с
96	Глицерин	Углекислый газ	30 %	0,22 м <sup>3</sup> /с
97	Стирол	Азот	35 %	0,5 м <sup>3</sup> /с
98	Ацетон	Азот	38 %	0,55 м <sup>3</sup> /с
99	Дизельное топливо	Порошок	0,5 кг/м <sup>3</sup>	0,44 кг/с
100	Диэтиловый эфир	Азот	33 %	0,52 м <sup>3</sup> /с
101	Бензол	Углекислый газ	25 %	0,45 м <sup>3</sup> /с
102	Керосин	Углекислый газ	28 %	0,38 м <sup>3</sup> /с
103	Бутиловый спирт	Азот	40 %	0,4 м <sup>3</sup> /с
104	Толуол	Азот	40 %	0,35 м <sup>3</sup> /с
105	бензин	Порошок	0,3 кг/м <sup>3</sup>	0,55 кг/с
106	Октан	Азот	36 %	0,48 м <sup>3</sup> /с

107	Керосин	Углекислый газ	29 %	0,3 м <sup>3</sup> /с
108	Бутиловый спирт	Порошок	0,6 кг/м <sup>3</sup>	0,3 кг/с
109	Бензол	Углекислый газ	27 %	0,44 м <sup>3</sup> /с
110	Бензин	Азот	36 %	0,5 м <sup>3</sup> /с
111	Соляровое масло	Порошок	0,5 кг/м <sup>3</sup>	0,48 кг/с
112	Дизельное топливо	Порошок	0,45 кг/м <sup>3</sup>	0,44 кг/с
113	Стирол	Порошок	0,6 кг/м <sup>3</sup>	0,5 кг/с
114	Октан	Азот	35 %	0,56 м <sup>3</sup> /с

**115–124.** Рассчитать количество огнетушащего вещества, необходимого для тушения пожара в закрытом аппарате:

№	Огнетушащее вещество	Огнетушащая концентрация, %	Объём аппарата, м <sup>3</sup>	Время тушения, с
115	Аргон	54	45	15
116	Азот	35	30	5
117	Гелий	37	60	15
118	Аргон	53	35	6
119	Аргон	54	44	7
120	Гелий	39	70	12
121	Гелий	39	65	10
122	Азот	35	50	20
123	Азот	37	55	18
124	Аргон	57	67	10

**125–144.** Рассчитать удельный расход и требуемое количество огнетушащего вещества, необходимого для тушения газо-воздушной смеси стехиометрического состава

№	Огнетушащее вещество	Огнетушащая концентрация, %	Расход газовой смеси, л/с	Время тушения, с
125	Аргон	55	50	5
126	Гелий	38	70	3
127	Аргон	54	80	2
128	Гелий	37	60	6
129	Аргон	54	65	5
130	Азот	35	30	15
138	Аргон	58	40	2
139	Гелий	37	64	8
140	Азот	36	60	16
144	Гелий	38	60	10
145	Гелий	38	60	9
146	Аргон	54	40	8

144	Аргон	56	61	6
-----	-------	----	----	---

**145–154.** Определить коэффициент использования воды при тушении пожара:

№	Площадь пожара, м <sup>2</sup>	Количество стволов А, шт	Количество стволов Б, шт	Время тушения, мин
145	150	1	2	25
146	90	–	3	15
147	59	2	–	10
148	116	1	3	20
149	225	2	2	30
150	310	1	4	42
151	400	2	3	40
152	510	2	4	59
153	340	1	4	46
154	275	0	4	37

**155–164.** Рассчитать коэффициент использования воды при тушении газового фонтана:

№	Дебит газового фонтана, м <sup>3</sup> /сутки	Удельный расход воды, л/с	Фактический расход воды, л/с
155	3,5	1,5	160
156	3,7	2,0	180
157	4,0	1,0	200
158	3,2	1,6	190
159	2,9	1,7	150
160	4,0	2,1	175
161	3,7	2,2	180
162	3,4	1,9	155
163	3,5	1,7	149
164	3,6	1,4	162

### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М.: ВИПТШ. – 1980. – 255 с.

2. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Методические указания к контрольной работе по курсу "Физико-химические основы развития и тушения пожаров". – М.: ВИПТШ. – 1980. – 58 с.
3. Амбросов А.С., Елисеев М.А. Примеры и задачи по курсу "Теоретические основы процессов горения". – М.: Академия ГПС. – 2000. – 179с.
4. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Лабораторный практикум по курсу: "Физико-химические основы развития и тушения пожаров". – М.: ВИПТШ. – 1980. – 67 с.
5. Карпов В.Л. Пожаровзрывобезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. // Пожаровзрывобезопасность, 1998, № 5. С. 36-43.
6. Карпов В.Л., Пономарёв А.А. Пожаровзрывобезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, № 5, С. 25–33.
7. Карпов В.Л. Пожаровзрывобезопасность регламентных и аварийных выбросов горючих газов. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, № 6, С. 38-45.
8. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках – М.: ГУГПС – ВНИИПО – МИПБ, 2000. – 78 с.
9. Безродный И.Ф., Гилетиг А.Н., Меркулов В.А. и др. Тушение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИПО, 1996. – 216 с.
10. Шароварников А.Ф., Воевода С.С. Прогноз периода времени выброса нефти при её длительном горении в вертикальном металлическом резервуаре. // Пожаровзрывобезопасность, 2001, № 1. – С. 44-46.
11. Шебеко Ю.Н., Малкин В.Л., Смолин И.М. и др. Методы оценки поражающих факторов крупных пожаров и взрывов на наружных технологических установках. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, № 4. – С. 18-27.
12. Мелихова А.С. Исследование процессов горения твёрдых неметаллических материалов в невесомости и при действии различного по величине ускорения силы тяжести. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, № 6 – С. 13-19.
13. Алиев А. В. В Подмосковье дымная мгла. // Пожарное дело, 2005, № 11 – С. 20.

14. Буев Н. Борьба с лесоторфяными пожарами – задача общая. // Пожарное дело, 2005, № 6 – С. 26-27.
15. Предотвращения распространения пожара. Пособие к СНиП 21-01-97 "Пожарная безопасность зданий и сооружений". – М.: ГУП УПП. – 1998. – 86 с.
16. Зернов С.И. Структура и содержание заключения пожарно-технической экспертизы.—М.: ВНИИСЭ.—1991. – 45с.
17. Зернов С.И., Левин В.А. Пожарно-техническая экспертиза.: учебное пособие.—М.: ВНКЦ МВД СССР, 1991.—79с.
18. Молчадский И.С. Пожар в помещении.—М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России.—2005.—456с.
19. ГОСТ 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования, методы контроля. – М.: издательство стандартов. – 1998. – 85 с.
20. Пособие к СНиП 21-01-97 "Пожарная безопасность зданий и сооружений". – М.: ЦНИИПРОМИЗДАТ. – 1998. – 66 с.
21. Зернов С.И. Расчетные оценки при решении задач пожарно-технической экспертизы: Учебное пособие.—М.: ЭКЦ МВД России. – 1992. – 88с.
22. Зернов С.И. Расчетные оценки при решении задач пожарно-технической экспертизы: Учебное пособие.—М.: ЭКЦ МВД России. – 1992. – 88с.
23. Баратов А.Н., Мышак Ю.А. Гетерогенные ингибиторы для подавления горения полимеров. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, № 5. – С. 14-19.
24. Еланский Е.А., Дьяков В.А., Кратенников Е.Г. Газовые огнетушащие составы. // Пожаровзрывобезопасность, 2005, № 1. – С. 87-90.
25. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. – М.: Стройиздат. – 1982. – С. 72.
26. Вайсман М.Н., Габриэлян С.Г. Средства тушения металлов. – // Пожарная безопасность, 1995, № 3-4. – С. 122-123.
27. Леонов Ф.И. Использование полимерных материалов в пожаротушении. // Пожаровзрывобезопасность, № 1. – С. 64-68.

28. Лобанов Ф.И. Использование полимерных материалов в пожаротушении. // Пожаровзрывобезопасность, 2004, № 1 – С. 64-68.
29. Коростелев В.Г. Аэрозольгенерирующие пожаротушащие составы. Основные типы составов и оптимальные условия их применения. // Пожаровзрывобезопасность, 2002, № 1. – С. 61-66.

#### **Нормативные документы**

1. Федеральный закон РФ от 22.07.08 г. № 123–ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». М.: МЧС России, 2008.
2. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. М. : Изд-во стандартов, 1991.
3. ГОСТ 11.1.044–89 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы определения . Введ. 1991.01.01 М. : Изд-во стандартов, 1991 -104с.
4. ГОСТ Р 51330.5–99 (МЭК 60079–4–75). Метод определения температуры самовоспламенения. М. : Изд-во стандартов, 1999 .
5. ГОСТ 27924–88 (МЭК 695–23–84). Испытания на пожароопасность. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1988.
6. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. М.: МЧС России, 2009.
7. СП 2.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты. М.: МЧС России, 2009.
8. СП 4.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. М.: МЧС России, 2009.
9. СП 9.13130.2009. Огнетушители. Требования к эксплуатации. М.: МЧС России, 2009.

Учебное издание

**Дроздова  
Татьяна Ивановна  
Плотникова  
Галина Викторовна  
Гольчевский  
В Ф**

**Физико-химические основы развития и тушения пожаров**

Учебное пособие

Редактор.....(И.О. Ф.)



