

И.И. Рашоян

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Учебное пособие



Тольятти
Издательство ТГУ
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения
Кафедра «Управление промышленной и экологической
безопасностью»

И.И. Рашоян

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Учебное пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

УДК 614.8 (075.8)

ББК 68.923 я73

P285

Рецензенты:

начальник ФГКУ «31 отряд ФПС по Самарской области»

полковник внутренней службы *В.А. Чугунов*;

канд. пед. наук, доцент Тольяттинского государственного
университета *Н.Е. Данилина*.

P285 Рашоян, И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара : учеб. пособие / И.И. Рашоян. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. — 107 с. : обл.

В учебном пособии изложены основные теоретические положения курса «Физико-химические основы развития и тушения пожара».

Предназначено для студентов направления подготовки 280700 «Техносферная безопасность» (профиль «Пожарная безопасность») всех форм обучения, а также может быть использовано при реализации технологии дистанционного обучения.

УДК 614.8 (075.8)

ББК 68.923 я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский
государственный университет», 2013

ВВЕДЕНИЕ

Знание и понимание законов и механизмов, по которым зарождается и развивается пожар, — необходимое условие верного выбора типа огнетушащих веществ, способов и параметров их подачи для успешного тушения пожара. Именно эти законы и механизмы изучаются в рамках специальной дисциплины — «Физико-химические основы развития и тушения пожара». Четкое представление об объективных физических и химических процессах, лежащих в основе всех существующих приемов и способов прекращения горения, — основа формирования профессионала в области обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения.

Таким образом, *целью дисциплины* является освоение основных физических и химических законов развития и тушения пожаров.

При изучении дисциплины решаются *следующие задачи*:

- 1) научить студентов анализировать обстановку на пожаре, исходя из особенностей протекающих физических и химических процессов и явлений;
- 2) научить прогнозировать на этой основе изменение обстановки в ходе тушения пожара;
- 3) привить навыки выбора способов и средств прекращения горения на пожаре в зависимости от параметров пожара, вида горючего и условий горения.

Дисциплина «Физико-химические основы развития и тушения пожара» относится к дисциплинам по выбору математического и естественнонаучного цикла дисциплин ФГОС ВПО. Базой для изучения дисциплины служат некоторые разделы математики, физики и химии. Изучаемый курс дает основы для последующего изучения таких дисциплин, как «Пожарная безопасность технологических процессов», «Пожарная безопасность в строительстве», «Основы производственной и пожарной автоматики», «Пожарная техника», «Пожарная тактика», «Основы расследования пожаров» и др.

В результате изучения дисциплины (учебного курса) студент формирует и демонстрирует *следующие компетенции ФГОС ВПО*.

- Общекультурные:

- самосовершенствование (сознание необходимости, потребность и способность учиться) (ОК-4);

- способность организовать свою работу ради достижения поставленных целей; готовность к использованию инновационных идей (ОК-6);
- способность к познавательной деятельности (ОК-10);
- способность использовать законы и методы математики, естественных, гуманитарных и экономических наук при решении профессиональных задач (ОК-11);
- способность использования основных программных средств, умение пользоваться глобальными информационными ресурсами, владение современными средствами телекоммуникаций, способность использовать навыки работы с информацией из различных источников для решения профессиональных и социальных задач (ОК-13);
 - профессиональные:
- способность пропагандировать цели и задачи обеспечения безопасности человека и природной среды в техносфере (ПК-11);
- способность ориентироваться в основных проблемах техносферной безопасности (ПК-19).

В результате изучения дисциплины (учебного курса) студент должен

• *знать:*

- теоретические основы процессов возникновения и распространения пожаров;
- параметры, определяющие динамику пожара;
- механизм формирования опасных факторов пожара;
- физико-химические основы прекращения горения;
- номенклатуру, способы применения и механизм действия огнетушащих составов;
- параметры процесса прекращения горения на пожарах и принципы их оптимизации;

• *уметь:*

- проводить анализ изменения параметров процессов горения и параметров пожаров в зависимости от различных факторов;
- рассчитывать параметры прекращения горения различными огнетушащими веществами;
- выбирать оптимальные способы их подачи в зону горения;

- *владеть:*

- методами расчета динамики опасных факторов пожара с использованием известных компьютерных программ;
- навыками работы со справочной литературой;
- навыками поиска, обработки и анализа информации для решения практических задач.

В основу учебного пособия положены материалы трудов таких ученых, как И.М. Абдурагимов, А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко и др.

В процессе изучения дисциплины теоретический материал, представленный в данном пособии, подробно объясняется студентам на лекционных занятиях. Кроме того, для более полного формирования знаний, умений и компетенций будущих специалистов и отработки навыков грамотного использования полученных теоретических знаний проводятся практические занятия, по результатам которых студентами составляются отчеты. Для подготовки студентов к вопросам итогового контроля знаний рекомендуется также ознакомиться с материалами дополнительной литературы из библиографического списка.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЖАРАХ

Пожар — это неконтролируемое горение вне специального ограждения, приносящее материальные и моральные убытки.

При пожарах одновременно протекает много различных физико-химических процессов и явлений. Явления, постоянные и обязательные для каждого пожара, называют **общими явлениями пожара**. К ним относятся:

- **горение** — химическая реакция окисления, сопровождающаяся выделением большого количества тепла и обычно свечением;
- **массообмен**, возникающий вследствие образования на пожаре конвекционных газовых потоков, которые обеспечивают поступление свежего воздуха в зону горения и отвод продуктов горения из неё;
- **теплообмен** (тепло, выделяющееся в зоне горения, передается в окружающую среду и частично расходуется на нагрев горючих веществ, строительных конструкций и т. п., таким образом делая возможным самостоятельное распространение пожара).

Горение можно *классифицировать* по следующим параметрам:

1) условию смесеобразования горючих компонентов:

- а) кинетическое (горение предварительно перемешанных газо- или паровоздушных смесей);
- б) диффузионное (горение, когда образование горючей среды — смешение горючего и окислителя — происходит перед зоной горения или в зоне горения);

2) интенсивности поступления горючих компонентов в зону химической реакции:

- а) ламинарное (компоненты горючей смеси поступают в зону горения сравнительно спокойно);
- б) турбулентное (компоненты горючей смеси поступают в зону горения с большой скоростью);

3) агрегатному состоянию компонентов горючей смеси:

- а) гомогенное (горючее и окислитель находятся в одинаковом агрегатном состоянии, как правило, газообразном);
- б) гетерогенное (горючее и окислитель находятся в различных агрегатных состояниях);

4) скорости распространения зоны химической реакции горения:

- а) дефлаграционное (медленное распространение зоны химической реакции, скорость от 0,5 до 50 м/с);
- б) детонационное (взрывное).

В реальных условиях пожара в основном встречается диффузионное горение, когда происходит смешение горючего с окислителем (кислородом воздуха) за счет диффузии.

Опасными факторами пожара являются:

- открытый огонь, искры;
- повышенная температура окружающей среды и предметов;
- токсичные продукты горения;
- дым;
- сниженная концентрация кислорода в воздухе;
- падающие части строительных конструкций;
- опасные факторы взрыва (ударная волна, световое излучение);
- ядовитые вещества, поступающие в окружающую среду из поврежденного оборудования.

Различают следующие *зоны пожара*:

- **зона горения** — часть пространства, в которой протекают процессы термической подготовки горючих веществ и само горение; зона горения включает объем, ограниченный фронтом пламени и поверхностью горящего вещества;

- **зона теплового влияния** — прилегающая к зоне горения часть пространства, в границах которой протекают процессы теплообмена между поверхностью зоны горения и окружающими конструкциями и веществами; внешняя граница зоны теплового влияния проходит там, где заметны изменения свойств материалов и конструкций или создаются условия, препятствующие работе людей без средств индивидуальной защиты;

- **зона задымления** — примыкающая к зоне горения часть пространства, в которой невозможно пребывание людей без средств защиты органов дыхания или осложнено ориентирование в результате недостаточной видимости.

Чтобы можно было описывать, исследовать или сравнивать пожары, необходимо использовать параметры, которые характеризовали бы разные стороны развития пожаров.

Основными параметрами развития пожара являются:

- удельная пожарная нагрузка;
- удельная горючая нагрузка;
- продолжительность пожара;
- площадь, периметр и фронт пожара;
- линейная скорость распространения пожара;
- массовая скорость выгорания пожарной нагрузки;
- температура пожара;
- интенсивность газообмена;
- плотность задымления;
- коэффициент поверхности горения;
- теплота пожара.

Удельная пожарная нагрузка $P_{\text{пож}}$ — это количество теплоты, которое может выделиться с единицы площади, занимаемой горящими материалами при пожаре (МДж/м²):

$$P = \frac{\sum_i M_i Q_{\text{н}i}}{S},$$

где M_i — масса i -го горючего материала, находящегося в помещении, кг; $Q_{\text{н}i}$ — низшая удельная теплота сгорания i -го материала, МДж/кг; S — площадь размещения горючих материалов, м².

Удельную горючую нагрузку измеряют как массу всех горючих и трудногорючих материалов, которая приходится на единицу занимаемой ими площади (кг/м²),

$$P = \frac{\sum_i M_i}{S}.$$

Продолжительность пожара — это время с момента возникновения пожара до прекращения горения.

Площадь пожара $S_{\text{п}}$ — площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость (м²).

Площадь поверхности $S_{\text{г}}$ горения характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении (м²).

Коэффициент поверхности горения (коэффициент пожарной нагрузки) $K_{\text{н}}$ — отношение площади поверхности горения к площади пожара, которое характеризует свободную для горения поверхность пожарной нагрузки,

$$K_{\pi} = \frac{S_{\Gamma}}{S_{\pi}}.$$

Фронт пожара — часть периметра пожара, на которой его распространение происходит наиболее интенсивно.

Массовая скорость выгорания v_m — количество вещества, которое выгорает в единицу времени (кг/с); массовая скорость выгорания зависит прежде всего от природы вещества, интенсивности газообмена, времени развития пожара.

Удельная массовая скорость выгорания v'_m — количество вещества, которое выгорает в единицу времени с единицы площади пожара (кг/(м²·с)),

$$v'_m = \frac{v_m}{S_{\pi}}.$$

Приведенная массовая скорость выгорания $v'_{\text{прм}}$ — масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения (кг/(м²·с)),

$$v'_{\text{прм}} = \frac{v_m}{S_{\Gamma}}.$$

Линейная скорость распространения пожара v_d — расстояние, которое проходит фронт пожара за единицу времени (м/с).

Температура пожара на открытом пространстве — температура в зоне горения. Температуру открытого пожара можно рассчитать как адиабатическую температуру горения вещества.

Температура пожара в ограждении — среднеобъемная температура газовой среды в помещении, в котором происходит пожар.

Интенсивность газообмена I_{Γ} — количество воздуха, которое при- текает в единицу времени к единице площади пожара (кг/(с·м²)).

Плотность задымления — количество дыма, которое на протяжении пожара остается в единице объема помещения (г/м³).

Теплота пожара (интенсивность тепловыделения) — количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени (Вт = Дж/с),

$$q = v'_m S_{\pi} Q_{\text{H}} \beta = v_m Q_{\text{H}} \beta,$$

где β — коэффициент полноты сгорания (0,75–0,9); Q_{H} — низшая теплота сгорания вещества, Дж/кг.

Приведенная теплота пожара, или плотность теплового потока (Вт/м²), определяется по формуле

$$q' = v'_{\text{прм}} Q_n \beta.$$

Для лучшего изучения пожаров, разработки приемов и средств тушения все пожары классифицируют по разнообразным признакам на группы, классы и виды.

По условиям газо- и теплообмена все пожары разделяют на две большие группы:

- пожары на открытом пространстве (открытые);
- пожары в ограждении (внутренние).

Первая группа пожаров характеризуется свободным газообменом с окружающей средой, который обуславливает высокую интенсивность протекания процессов горения. Условия газообмена зависят от внешних естественных газовых потоков (от скорости и направления ветра, влажности воздуха и др.). При этом теплообмен осуществляется конвекцией и излучением практически с неограниченным окружающим пространством, не происходит накопление тепла в зоне горения. За температуру таких пожаров принимают температуру пламени. К открытым пожарам относятся природные пожары, пожары газовых и нефтяных фонтанов, складов древесины, горючих жидкостей в резервуарах, пожары на технологических установках объектов газовой, нефтяной, химической промышленности и т. п.

Вторая группа пожаров характеризуется зависимостью газо- и теплообмена от большого числа факторов: вида горючего материала, величины и расположения пожарной нагрузки, размеров и расположения проемов в конструкциях здания и др. Теплообмен осуществляется конвекцией, теплопроводностью и излучением. За температуру таких пожаров принимают среднюю температуру газовой среды горящего помещения.

Все пожары условно разделяют на *классы А, В, С, D и Е*, классы подразделяют на подклассы в зависимости от физико-химических особенностей веществ и особенностей их горения.

К пожарам *класса А* относятся такие, при которых в основном горят твердые горючие вещества. В свою очередь пожары *класса А* подразделяются на подклассы А1 и А2. К пожарам *подкласса А1* относят горение материалов, способных к тлению (к таким можно

отнести все целлюлозосодержащие материалы, то есть материалы, для которых характерны как гомогенный, так и гетерогенный режим горения). Горение материалов, горящих только в гомогенном режиме, относят к пожарам *подкласса А2*.

К *классу В* относятся пожары горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, причем в тех случаях, когда горят водонерастворимые жидкости, его относят к *подклассу В1* (нефть и нефтепродукты). При горении водорастворимой горючей жидкости пожар относят к *подклассу В2*.

Горение горючих газов относят к пожарам *класса С*.

Горение горючих металлов и их соединений имеет ряд особенностей, связанных с параметрами процесса горения и выбором огнетушащих веществ. По этой причине пожары таких материалов вынесли в отдельный *класс D*, разбитый на три подкласса. *Подкласс D1* — горение так называемых легких металлов, к которым относят металлы второй, третьей и четвертой групп периодической системы Менделеева (магний, алюминий, стронций, барий, титан, цирконий и другие). Их горение сопровождается сильным тепловыделением, высокой температурой и тепловым излучением. *Подкласс D2* — горение щелочных металлов. Главной особенностью таких пожаров является возможность самого металла реагировать с водой и с водно-пенными средствами тушения. *Подкласс D3* — горение металлоорганических соединений.

Пожары электроустановок под напряжением относят к *классу Е*.

От вида и агрегатного состояния горючего материала зависят основные параметры развития пожара. Выбор способа и средств тушения пожаров зависит от вида пожарной нагрузки, класса пожара, условий газообмена и других параметров.

Модуль I. ОТКРЫТЫЕ ПОЖАРЫ

1. Пожары газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов

1.1. Классификация пожаров фонтанов

Пожары фонтанов условно разделяют на три группы: газовые, газонефтяные и нефтяные.

Газовыми считаются фонтаны с содержанием горючего газа не менее 95% по массе.

Газонефтяными считаются фонтаны с содержанием газа более 50% и нефти менее 50% по массе.

К нефтяным относятся фонтаны с содержанием нефти более 50% по массе.

Кроме того, газовые и газонефтяные фонтаны условно подразделяются по мощности (дебиту):

- слабые — с дебитом газа до 2 млн м³/сутки;
- средние — от 2 до 5 млн м³/сутки;
- мощные — свыше 5 млн м³/сутки.

Дебит — расход газа при пожаре (млн м³/сутки).

1.2. Структура факела газового фонтана

Горение газового фонтана является диффузионным. В окружающую атмосферу вытекает свежий газ, а горение происходит в результате взаимной диффузии газа и кислорода.

Рассматривая факелы газонефтяных фонтанов, можно пользоваться основными закономерностями турбулентных газовых струй, так как при соотношении массы жидкой фазы (нефти) к массе газа около единицы отношение объемов газа и нефти будет около тысячи. По мере удаления от среза трубы (за счет массообмена струи с окружающим воздухом) это соотношение будет увеличиваться в десятки раз. Скорость движения капелек нефти в струе будет приблизительно равна скорости движения газовой фазы. Поэтому такую двухфазную струю можно рассматривать как свободную затопленную турбулентную струю.

На рис. 1 показано распространение струи горячего газа из вертикальной трубы в воздух.

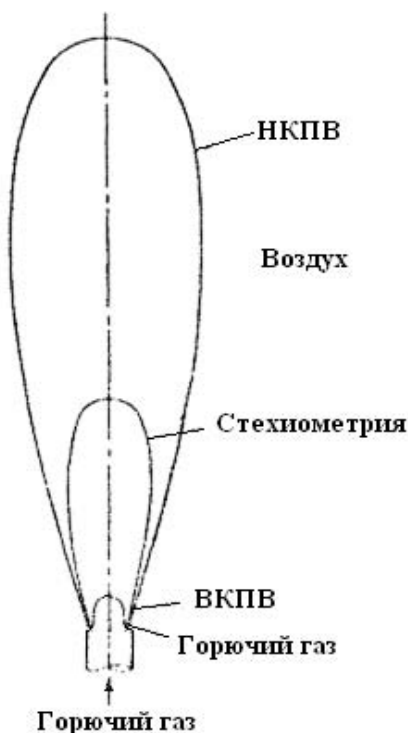


Рис. 1. Структура диффузионного пламени горячего газа¹

Из рисунка видно, что существуют три области концентраций горючей смеси, соответствующие

- нижнему концентрационному пределу воспламенения (НКПВ),
- стехиометрическому составу смеси,
- верхнему концентрационному пределу воспламенения (ВКПВ).

¹ Здесь и далее в рисунках использованы материалы иллюстраций: Абдурагимов И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. — М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980. — 256 с.

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени (воспламенения) — минимальное (максимальное) содержание горючего в смеси (горючее вещество — окислительная среда), при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Все смеси горючего с концентрациями от 0 до НКПВ не способны воспламеняться даже от мощного источника зажигания — это область безопасных концентраций. В пределах от НКПВ до ВКПВ смесь горючего с воздухом способна воспламеняться и сгорать со скоростью взрыва, при этом пламя распространяется на весь объем горючей смеси — это область воспламенения. Область концентраций выше ВКПВ, вплоть до 100%, называется пожароопасной.

Стехиометрический состав горючей смеси — состав смеси, в которой окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления топлива без остатка избыточного кислорода.

Горение будет идти с максимальной скоростью в области, соответствующей стехиометрическому составу смеси.

На рис. 2 показана структура турбулентной горячей струи в произвольном сечении А-А.

При турбулентном диффузионном горении концентрации газа C_{Γ} и кислорода C_{O_2} падают до нуля в зоне горения, а концентрация продуктов горения C_{Π} и температура достигают максимума. Образующиеся продукты горения диффундируют как в окружающее пространство, так и внутрь факела, смешиваясь с горючим газом.

Воспламенение турбулентной струи газа осуществляется по периферии, где скорость распространения пламени имеет максимальное значение. По мере удаления от среза трубы зона высоких температур приближается к оси трубы. Это расстояние называется длиной зоны воспламенения $H_{зв}$. Длина зоны воспламенения тем больше, чем выше молекулярная масса горючего, так как для сгорания единицы массы газа должно поступить большее количество воздуха из окружающей атмосферы.

В зоне догорания ($H_{зд}$) происходит догорание отдельных молей горючего. Процесс смешивания в этой зоне осуществляется в основном за счет молекулярной диффузии. Эта зона характеризуется значительным недостатком кислорода, поэтому сгорание газа происходит очень медленно.

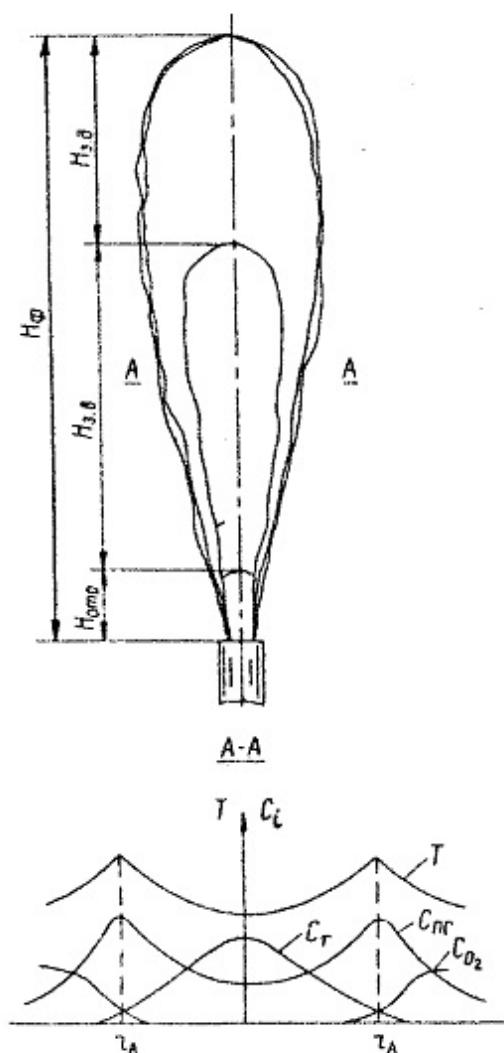


Рис. 2. Структура турбулентной горячей струи газа

1.3. Дебит фонтана и методы его оценки

Фронт горения в турбулентном факеле пламени из-за пульсаций масс горючего, воздуха и продуктов горения получается размытым, раздолбленным и неустойчивым. Особенно это проявляется в зоне догорания.

Одним из важных параметров газового факела является его длина (высота). Установлена экспериментальная зависимость между высотой факела H_ϕ и дебитом (расходом) газовой скважины:

$$H_\phi = 23 V_\Gamma^{0,4},$$

где V_Γ — дебит фонтана (расход газа), млн м³/сутки.

Для практических расчетов с точностью $\pm 5\%$ может быть использована более простая формула для определения дебита фонтана

$$V_\Gamma = 0,0025 H_\phi^2,$$

что соответствует высоте факела

$$H_\phi \approx 20 \sqrt{V_\Gamma}$$

Высота пламени у газонефтяных фонтанов несколько больше, чем у газовых. Нефтяные фонтаны с большим дебитом нефти и незначительным содержанием газа имеют небольшую высоту факела пламени (примерно 20–30 м).

1.4. Зона отрыва пламени

Из теории горения известно, что для стабилизации фронта пламени необходимым условием является равенство скорости газового потока w_Π и скорости распространения пламени v_p ($w_\Pi = v_p$).

Турбулентное горение характеризуется значительно большей скоростью v_t , чем нормальные скорости горения. Турбулентная скорость распространения пламени v_t зависит от скорости потока и концентрации горючей смеси (рис. 3).

При высоких давлениях скорость потока газа на срезе трубы значительно превышает величину турбулентной скорости распространения пламени v_p , при этом факел пламени отрывается, и процесс горения газа начинается на некотором расстоянии от среза трубы ($H_{\text{отр}}$ на рис. 2). Если скорость истечения газа мала, то пламя почти соприкасается с устьем. При увеличении скорости газа высота отрыва факела увеличивается, и при некоторой скорости может

произойти газодинамический срыв пламени, т. е. самопроизвольное потухание.

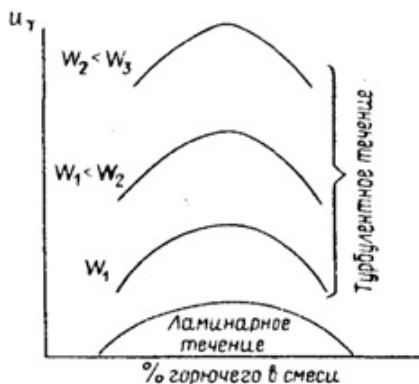


Рис. 3. Зависимость турбулентной скорости распространения пламени от концентрации горючего в смеси и скорости потока

1.5. Расчет безопасных расстояний

Теплота пожара газового фонтана определяется по формуле

$$q = \beta Q_n V_r$$

где Q_n — низшая теплота сгорания газа, Дж/м³; V_r — расход (дебит) газового фонтана, м³/с; β — коэффициент полноты сгорания (для газовых фонтанов $\beta \approx 1$).

Одним из факторов, препятствующих ликвидации пожаров газовых фонтанов, является высокая плотность потока теплового излучения факела пламени, которая для компактного вертикального факела газового фонтана в безветренную погоду может быть рассчитана по формуле (Вт/м²)

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

где f — коэффициент излучения факела пламени, учитывающий рассеивание излучения в окружающее пространство; R — расстояние от центра пламени до рассматриваемой точки на поверхности земли, м.

Коэффициент излучения факела f определяется по формуле

$$f = 0,05\sqrt{M},$$

где M – средняя молярная масса компонентов горючей смеси, равная

$$M = \Sigma M_i a_i,$$

где M_i – молярная масса i -го компонента горючей смеси; a_i – доля i -го компонента в смеси.

Значение f принимается, например,

- для метана – 0,2;
- пропана 0,33;
- других углеводородов – 0,4.

Зная безопасную величину плотности потока теплового излучения, можно рассчитать предельное расстояние (рис. 4) от центра факела:

$$R = \sqrt{\frac{fq}{4\pi q'_{\text{безоп}}}}.$$

При расчетах принимают, что тепловое излучение с интенсивностью $5,6 \cdot 10^6$ Дж/(м²·ч) является безопасным и личный состав может выдерживать такие тепловые нагрузки без специальной защиты в течение неограниченного времени.

Безопасное расстояние (рис. 4), на котором может работать личный состав, рассчитывается по формуле

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

При сильном ветре пламя факела отклоняется от вертикального положения (рис. 5), поэтому зона теплового воздействия будет иметь форму эллипса. В этом случае безопасное расстояние от устья скважины увеличивается и может быть рассчитано по формуле

$$L_{\text{безоп}} = \left\{ R^2 - \left[H + \left(\frac{H_{\Phi}}{2} - H \right) \cos \theta \right]^2 \right\}^{1/2} + (X_M - H) \sin \theta,$$

где θ – угол наклона факела пламени.

Подставив в формулу известные константы и рассчитанную величину R , получим безопасное расстояние до устья скважины, где

может находиться личный состав неограниченное время без специальных защитных средств.

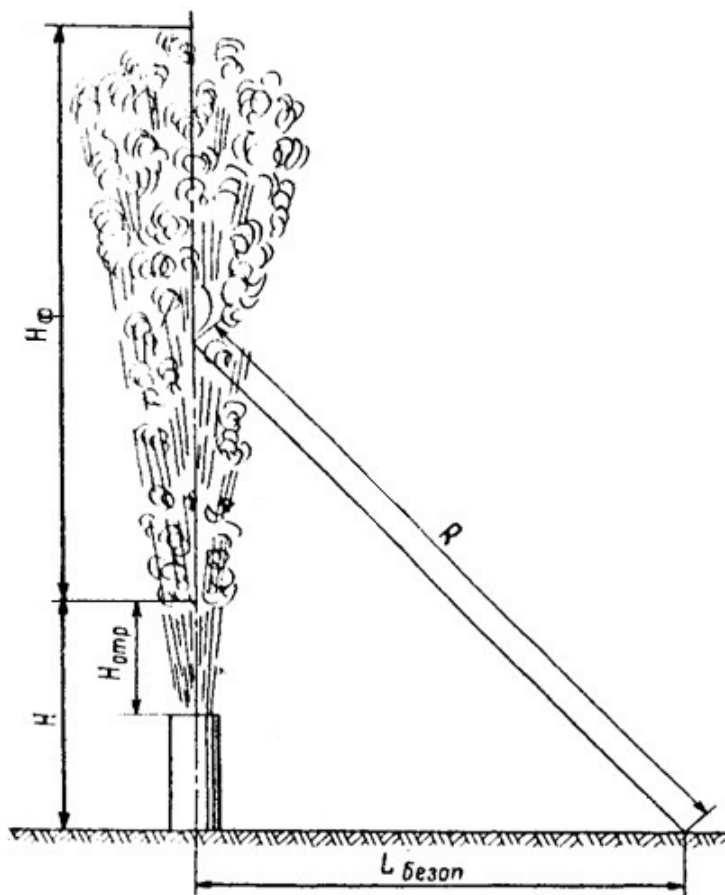


Рис. 4. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния до горящего факела газового фонтана

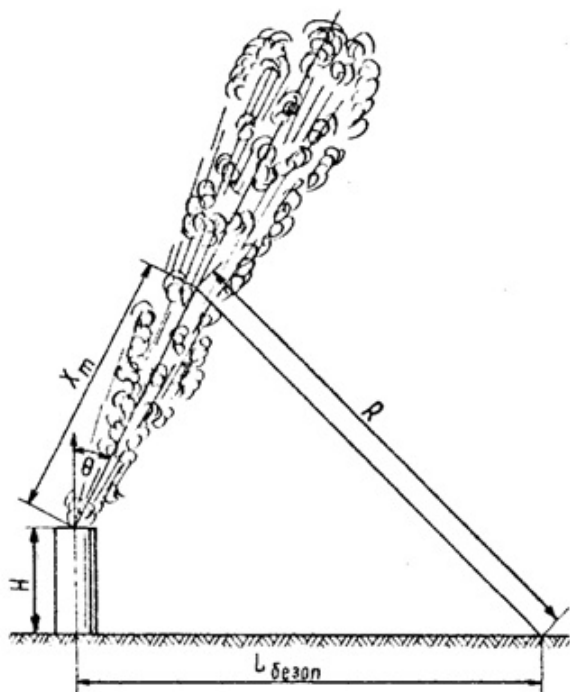


Рис. 5. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния для наклонного факела газового фонтана

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируются пожары фонтанов?
2. Что такое стехиометрический состав горючей смеси?
3. Опишите методы оценки дебита газового фонтана.
4. Что происходит в зоне отрыва пламени фонтана?
5. Как произвести расчет безопасного расстояния при тушении пожаров фонтанов?

2. Пожары резервуаров

2.1. Массовая и линейная скорости выгорания жидкости, высота пламени

Горение жидкости в резервуаре представляет собой горение паровоздушной смеси, образующейся над зеркалом горючей жидкости. Горят пары жидкости, а не сама жидкость. Количество паров зависит от скорости испарения. Испарение — переход жидкости в пар со свободной поверхности при температуре ниже точки кипения.

При горении жидкостей в резервуарах коэффициент пожарной нагрузки равен

$$K_n = 1.$$

Характер, форма и размеры пламени определяются в основном видом горючей жидкости (ГЖ), ее температурой и размерами сосуда.

Пламя горючих жидкостей в резервуарах является диффузным, т. е. процесс перемешивания горючего и окислителя происходит непосредственно в зоне горения.

Для небольших сосудов характерны ламинарные режимы горения. С увеличением объемов сосудов режим горения переходит в турбулентный.

Высота пламени $H_{пл}$ горящего резервуара прямо пропорциональна его диаметру D_p и примерно равна следующим величинам:

- для бензина $H_{пл} \approx 1,5D_p$;
- для дизельного топлива $H_{пл} \approx D_p$;
- для этилового спирта $H_{пл} \approx 0,8D_p$.

При тушении горящих жидкостей с поверхности резервуаров необходимо знать температуру факела пламени и его лучистый тепловой поток. Экспериментально установлено, что с увеличением диаметра резервуара средняя температура факела пламени уменьшается, а лучистый тепловой поток возрастает. Для многих горючих жидкостей конкретные значения этих факторов можно найти в справочниках.

Количество тепла, выделяемого при горении жидкости в резервуаре, можно найти по формуле

$$q = \pi R^2 v_{\text{л}} \rho \beta Q_H$$

где R — радиус резервуара, м; ρ — плотность жидкости, кг/м³; $v_{\text{л}}$ — линейная скорость выгорания жидкости.

Различают массовую, удельную и линейную скорости выгорания жидкости.

Массовая скорость выгорания — количество горючей жидкости, сгорающей в единицу времени (кг/с).

Массовая скорость выгорания не является постоянной величиной, а зависит от ряда факторов: природы жидкости, диаметра резервуара, режима горения (ламинарный или турбулентный), высоты слоя жидкости, условий теплообмена с внешней средой. Скорость выгорания для различных жидкостей заранее определяют экспериментально.

Удельная (приведенная) массовая скорость выгорания ($v_{\text{м}}'$) — количество жидкости, выгоревшее с единицы ее площади в единицу времени (кг/(м²·с)).

Линейная скорость выгорания ($v_{\text{л}}$) — расстояние, на которое опускается уровень жидкости в единицу времени при горении (м/с).

Удельная массовая и линейная скорости выгорания взаимосвязаны друг с другом через плотность жидкости ρ следующей зависимостью:

$$v_{\text{м}}' = v_{\text{л}} \cdot \rho.$$

Экспериментально установлено, что по мере снижения уровня жидкости в резервуаре скорость ее выгорания уменьшается. Изменение уровня жидкости с течением времени описывается эмпирическим уравнением

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

где H — уровень ГЖ в резервуаре, м; K — коэффициент пропорциональности; τ — время горения, с; $n = 0,55 \dots 0,75$ — показатель степени.

Уменьшение скорости выгорания обусловлено тем, что с увеличением расстояния до зоны горения понижается концентрация паров жидкости, в зону горения попадают и продукты горения, доступ воздуха затрудняется. Существует такая высота борта, когда горение прекращается самостоятельно. Для резервуара диаметром 5 м, например, горение прекращается на глубине 11 м.

Значения скорости выгорания некоторых жидкостей для резервуаров диаметром больше 1,3 м приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скорости выгорания жидкостей

Жидкость	$v_d \cdot 10^6$, м/с	Жидкость	$v_d \cdot 10^6$, м/с
Ацетон	55	Керосин	58–65
Бензол	92–97	Мазут	37
Диэтиловый спирт	83	Толуол	68–78
Изопептан	168	Хлорбензол	28–47
Изопропилбензол	60–73	Циклогексанол	42–45
Изопропиловый спирт	42–45	Этиловый спирт	33–42

Таким образом, скорость выгорания жидкости при пожарах в резервуарах зависит от следующих факторов:

- природа жидкости (плотность, температура воспламенения и др.);
- начальная температура жидкости: с увеличением начальной температуры жидкости скорость выгорания увеличивается, поскольку снижаются затраты тепла на прогрев жидкости до температуры кипения;
- диаметр резервуара, влияющий на характер подвода тепла от зоны пламени к жидкости;
- уровень жидкости в резервуаре: с его увеличением массовая скорость выгорания увеличивается, так как облегчается доступ воздуха;
- влажность жидкости: содержание влаги понижает скорость выгорания жидкости вследствие дополнительных затрат на ее испарение в зоне горения;
- содержание кислорода в атмосфере: большинство жидкостей не способны к горению в атмосфере с содержанием кислорода менее 15%; с повышением концентрации кислорода выше этого предела скорость выгорания возрастает.

2.2. Прогрев жидкости по глубине. Гомотермический слой.

Явления вскипания и выброса жидкости при горении ее в резервуарах

После воспламенения температура на поверхности жидкости быстро возрастает, достигая определенного значения. Для химически чистых, однородных ГЖ она очень близка к температуре кипения, но всегда несколько ниже ее. Для неоднородных нефтепродуктов температура поверхностного слоя всегда несколько выше температуры кипения данной жидкости. Это обусловлено тем, что при горении полифракционных нефтепродуктов в поверхностном слое всегда происходит перегонка жидкостей с выходом более летучих фракций.

Температурное поле в слое ГЖ неравномерно как по координатам (по толщине и в горизонтальной плоскости), так и по времени. Экспериментально установлено, что при горении жидкостей распределение температур по толщине может быть двух типов.

В одном случае передача тепла осуществляется теплопроводностью, что приводит к прогреву жидкости на небольшую глубину (2—5 см). Температура в прогретом слое быстро понижается с увеличением расстояния от поверхности жидкости. Величина прогретого слоя остается постоянной и не изменяется по мере выгорания жидкости.

В другом случае при горении жидкостей в резервуарах большого диаметра возникает прогретый слой, толщина которого растет во времени, а температура в этом слое почти одинакова с температурой на поверхности. У борта жидкость нагревается быстрее, так как тепла на борт попадает больше. Более нагретая у стенок жидкость поднимается вверх, что способствует интенсивному перемешиванию и быстрому прогреву жидкости на большую глубину. Слой кипящей жидкости будет увеличиваться, пока не закипит вся жидкость. Образуется так называемый гомотермический слой.

Глубина, на которую опустится нижняя граница гомотермического слоя за время горения τ , складывается из толщины выгоревшего слоя жидкости ΔH , м, и толщины самого слоя $\delta_{гт}$, м (рис. 6).

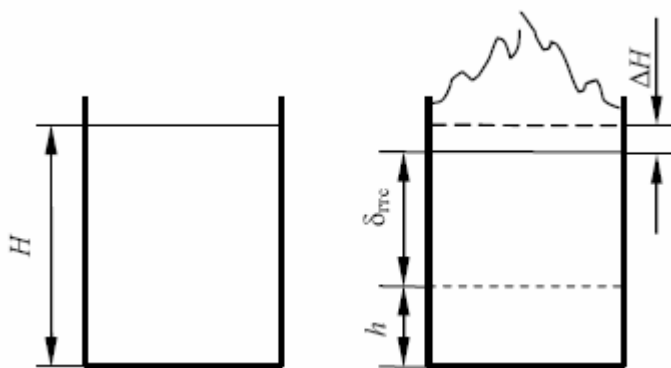


Рис. 6. Схема для определения толщины гомотермического слоя

Тогда

$$h = H - (\Delta H + \delta_{\text{гтс}});$$

$$\Delta H = \tau \cdot v_{\text{л}};$$

$$\delta_{\text{гтс}} = \tau \cdot v_{\text{гтс}},$$

где $v_{\text{гтс}}$ — скорость нарастания гомотермического слоя (зависит от природы жидкости), м/с.

Образование гомотермического слоя возможно также и в результате фракционной перегонки приповерхностных слоев смеси жидкостей, имеющих различную температуру кипения. По мере выгорания таких жидкостей приповерхностный слой обогащается более плотными высококипящими фракциями, которые опускаются вниз, способствуя тем самым конвективному прогреву жидкости.

Установлено, что чем выше температура кипения жидкости (дизельное топливо, трансформаторное масло, мазут и др.), тем труднее образуется гомотермический слой. При их горении температура стенок резервуара редко превышает температуру кипения.

Когда есть смесь жидкостей, то процесс выгорания более сложный. В процессе горения смеси жидкостей, имеющих разную температуру кипения (бензины, нефть и т. д.), происходит как бы их фракционная перегонка. Вначале происходит выход легкокипящих фракций, затем — все более высококипящих. Этот процесс сопровождается постоянным повышением температуры на поверхности жидкости.

При горении влажных высококипящих нефтепродуктов вероятность образования гомотермического слоя также высока. Возможность образования достаточно толстого гомотермического слоя при горении влажных нефтепродуктов чревата явлениями вскипания и выброса жидкости. Если температура кипения жидкости выше, чем температура кипения воды, то вода вскипает и выделяется пар, увеличивается объем (в 1700 раз объем водяного пара больше объема жидкости) и происходит выброс жидкости из резервуара. Перед выбросом наблюдается вибрация стенок резервуара, начинается подъем жидкости, слышен гул. Это явление приводит к резкому увеличению площади пожара, интенсификации его развития и распространения. Кроме того, это явление представляет большую опасность для личного состава.

Если при горении любых жидкостей охлаждать стенки резервуара, то гомотермического слоя не возникает, так как прогрев ГЖ осуществляется с помощью механизма теплопроводности.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение массовой и линейной скоростям выгорания жидкости.
2. Опишите механизм прогрева жидкости по глубине при горении.
3. Как образуется гомотермический слой при горении жидкостей?
4. Охарактеризуйте явления вскипания и выброса жидкости при горении ее в резервуарах.

3. Открытые пожары твердых горючих материалов (ТГМ)

3.1. Пожары на складах лесоматериалов

Как и все открытые пожары, пожары на складах лесоматериалов характеризуются отсутствием ограничений для газообмена и своеобразием параметров зон горения.

Особенностью таких пожаров является большая скорость их распространения, которая связана со скоростью ветра и разлетом искр и головней вследствие образования аэродинамического вихря в зоне горения.

Также особенностью пожаров на складах лесоматериалов является большой объем зоны горения, который связан с большим объемом нагретых продуктов горения и свежего воздуха. Аэродинамические потоки способствуют созданию все новых очагов пожаров, часто на большом расстоянии от основной зоны горения.

Пожары на складах лесоматериалов характеризуются высокими скоростями выгорания. Удельная массовая скорость выгорания (с единицы площади пожара) может составлять несколько десятков килограммов с 1 м^2 в минуту.

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

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

Время и скорость распространения пламени определяются временем прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения. Таким образом, уменьшение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к увеличению скорости распространения пламени. Наоборот, увеличение линейных размеров пожарной нагрузки приводит к возрастанию времени прогрева поверхностного слоя до температуры воспламенения и к уменьшению скорости распространения пламени.

Таким образом, важной характеристикой для таких пожаров является коэффициент пожарной нагрузки $K_{\text{п}}$, который зависит от вариантов планировки штабелей и стеллажей на складах лесоматериалов (табл. 2). Как правило, коэффициент пожарной нагрузки на складах лесоматериалов больше единицы.

Большое влияние на скорость распространения пламени оказывает влажность древесины. Во-первых, повышается теплоемкость влажного материала и увеличиваются затраты тепла на его нагрев. Во-вторых, требуются дополнительные затраты тепла на испарение влаги. В-третьих, увеличивается теплопроводность материала, что вызывает дополнительные потери тепла на его прогрев. Увеличение влажности материала с 11 до 28% приводит к снижению скорости распространения пламени в 4 раза.

Таблица 2

Коэффициент пожарной нагрузки для складов лесоматериалов

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

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

$$v_p = v_{po} \left[1 + 0,14 \left(\frac{v_B}{v_{po}} \right)^{0.32} \right],$$

где v_{po} – скорость распространения пламени по штабелям при отсутствии ветра, м/с; v_B – скорость ветра, м/с.

Безопасное расстояние при пожарах штабелей может быть определено по эмпирической зависимости

$$L_{\text{безоп}} = 1,6H,$$

где H – общая высота штабеля и пламени, м.

3.2. Лесные пожары

Вероятность возникновения и распространения лесных пожаров существенно возрастает в сухую жаркую погоду, когда происходит не только подсушивание, но и предварительный разогрев материалов.

Скорость распространения огня днем больше, чем ночью, так как в ночное время снижается температура окружающей среды и происходит увеличение влажности воздуха и горючих материалов.

На распространение лесных пожаров влияет рельеф местности. Если пожар распространяется вверх по склону, его распространению способствует предварительный разогрев лесных горючих ма-

териалов потоками нагретых продуктов горения. Скорость распространения пожара в этом случае больше, чем на горизонтальном участке леса. При распространении пожара вниз по склону скорость уменьшается.

Различают низовые и верховые лесные пожары.

При низовом пожаре сгорает лесная подстилка, состоящая из опавших листьев, хвои, веток. Сгорает также живой покров — мох, кустарники, трава. Особенности этих пожаров являются небольшие скорость распространения (до 5 км/ч) и высота пламени (2–2,5 м).

При верховом пожаре распространение горения происходит по кронам деревьев. Скорость распространения верховых пожаров может достигать 25 км/ч. Быстрому развитию лесных верховых пожаров способствует ветер, достигающий скорости 6–12 м/с и более. При верховых пожарах возможно образование мощной конвекционной колонки (высотой до 5 км), за счет которой на высоту свыше 1 км поднимаются горящие угли. Выпадая на еще не горящие участки леса, они образуют новые очаги пожаров.

Важнейшими характеристиками лесных пожаров являются скорость их распространения и высота пламени.

По скорости распространения и степени воздействия на растительность лесные пожары подразделяются на беглые и устойчивые. При беглом пожаре фронт пламени распространяется «скачками», сгорает более сухой материал, большая часть площади остается не затронутой огнем. При устойчивом пожаре огонь «заглубляется»: прогорают корни и кора деревьев, сгорают валежник, сухостой, травяная подстилка.

По высоте пламени пожары делятся на слабые, средние и сильные. Скорость распространения слабого низового пожара не превышает 1 м/мин, среднего — от 1 до 3 м/мин, сильного — свыше 3 м/мин. Слабый верховой пожар имеет скорость до 3 м/мин, средний — до 100 м/мин, а сильный — свыше 100 м/мин.

3.3. Торфяные пожары

Торф в естественных условиях не способен к самостоятельному горению из-за его высокой влажности. При длительном сохранении жаркой засушливой погоды создаются условия для возникновения торфяных пожаров даже на неосушенных полях.

В местах массовой залежи торфа возможно возникновение подземных пожаров. Торфяные пласты могут гореть без доступа воздуха с поверхности, что затрудняет тушение торфяных пожаров. При выгорании торфяного пласта под поверхностью почвы образуется каверна (полость), которая может представлять опасность провала для людей и техники. Скорость распространения таких подземных пожаров невелика (несколько метров в сутки).

Слабым подземным считается такой пожар, глубина прогорания которого не превышает 25 см, средним — от 25 до 50 см, сильным — более 50 см.

Осушенные залежи торфа способны гореть в любую погоду. Особенно пожароопасны торфполя на добывающих предприятиях, где торфяная масса перерабатывается в мелкую крошку и высушивается. При скорости ветра более 10 м/с горящая крошка легко поднимается воздушными потоками и переносится на значительное расстояние (до 50 м), образуя новые очаги возгорания. Скорость распространения таких пожаров достигает 20–25 м/мин. Форма площади пожара чаще бывает угловой с расширением ее по направлению ветра. Торфяная крошка содержит в своих порах достаточное количество воздуха, поэтому способна тлеть без доступа воздуха извне.

3.4. Степные пожары и пожары хлебных массивов

Эти пожары являются наиболее опасными в периоды устойчивой засушливой погоды. Скорость распространения пожара достигает 700 м/мин, так как трава и злаковые растения имеют малое сечение стебля, представляют собой тонкостенные полые трубки и легко воспламеняются. Наличие ветра также способствует увеличению скорости распространения пожара вследствие наклона факела пламени к еще не горящим материалам и из-за переноса искр.

Другой особенностью таких пожаров является сравнительно небольшая ширина фронта горения, что обусловлено малым запасом горючих материалов на единице горящей площади и высокой скоростью выгорания.

Иногда при таких пожарах образуются так называемые огненные смерчи, которые способствуют переходу огня через препятствия шириной до 12 м (реки, дороги, противопожарные полосы и др.).

Степные пожары могут переходить в лесные, торфяные и вызывать пожары в близлежащих населенных пунктах.

В случае загорания стогов сена и соломы пламя быстро распространяется по их поверхности, а затем происходит процесс относительно медленного их выгорания (тления). Выгорание может интенсифицироваться при наличии ветра, так как увеличивается скорость притока воздуха к тлеющим поверхностям. Также возможен перенос ветром горящих частиц и увеличение площади пожара.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы особенности пожаров на складах лесоматериалов?
2. Опишите лесные пожары.
3. Чем характеризуются торфяные пожары?
4. Чем опасны степные пожары и пожары хлебных массивов?

Модуль II. ВНУТРЕННИЕ ПОЖАРЫ

4. Динамика внутренних пожаров

4.1. Основные параметры внутренних пожаров и методы их определения

Под динамикой пожара понимается изменение основных параметров пожара во времени и пространстве. В качестве основных таких параметров для внутренних пожаров принимают

- площадь пожара $S_{\text{п}}$;
- температуру пожара $T_{\text{п}}$;
- интенсивность задымления на пожаре $I_{\text{г}}$.

Эти параметры пожара наиболее доступны измерению, анализу, расчету. Они служат исходными параметрами для определения вида применяемой техники и расчета сил и средств пожаротушения и т. п.

Рассмотрим количественно некоторые основные параметры пожара, определяющие динамику его развития.

Определим интенсивность тепловыделения на пожаре по уже известной нам формуле

$$q = v'_m S_{\text{п}} Q_{\text{н}} \beta,$$

где β – эмпирический коэффициент полноты сгорания материала (коэффициент химического и физического недожиг); $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

Удельная массовая скорость выгорания определяется по формуле

$$v'_m = (aT_{\text{п}} + bI_{\text{г}})v'_{\text{прм}},$$

где a, b – эмпирические коэффициенты для данного вида горючего; $v'_{\text{прм}}$ – приведенная массовая скорость выгорания для данного вида горючего материала; $T_{\text{п}}$ – среднее значение температуры пожара; $I_{\text{г}}$ – интенсивность газообмена.

Линейная скорость распространения пожара также зависит от вида горючего, средней температуры пожара и интенсивности газообмена:

$$v_{\text{л}} = (a_{\text{л}}T_{\text{п}} + b_{\text{л}}I_{\text{г}})v_{\text{ло}},$$

где $a_{\text{л}}, b_{\text{л}}$ — эмпирические коэффициенты, устанавливающие зависимость линейной скорости распространения пожара для данного вида горючего от средней температуры и интенсивности газообмена; $v_{\text{ло}}$ — линейная скорость распространения горения для данного вида горючего.

Такие параметры, как среднее значение температуры пожара $T_{\text{п}}$ и интенсивность газообмена $I_{\text{г}}$, как правило, возрастают по мере развития пожара, увеличивая удельную и линейную скорости выгорания.

Зависимость площади пожара от основных параметров его развития имеет вид

$$S_{\text{п}} = k(v_{\text{л}}\tau)^n,$$

где k и n — коэффициенты, зависящие от геометрической формы площади пожара; $v_{\text{л}}$ — линейная скорость распространения пожара, м/с; τ — время свободного развития пожара, с.

Для *пожара круговой формы* при равномерном распределении пожарной нагрузки по площади пола помещения и отсутствии интенсивных направленных потоков воздуха $k = \pi$, $n = 2$, отсюда

$$S_{\text{п}} = \pi(v_{\text{л}}\tau)^2.$$

При *полукруглой форме пожара* (при таких же условиях), возникающего у несгораемой вертикальной стенки или у края расположения пожарной нагрузки, $k = \pi/2$, $n = 2$, отсюда

$$S_{\text{п}} = \frac{\pi}{2}(v_{\text{л}}\tau)^2.$$

При пожаре, возникшем в углу помещения (*угловая форма*), $k = \pi/4$, $n = 2$, отсюда

$$S_{\text{п}} = \frac{\pi}{4}(v_{\text{л}}\tau)^2.$$

Для *прямоугольной площади пожара*, распространяющегося в обе стороны (при тех же начальных условиях), $k = 2a$, $n = 1$, где a — ширина фронта распространения пожара, м. При этом получим

$$S_{\text{п}} = 2av_{\text{л}}\tau.$$

Для *прямоугольной площади одностороннего пожара* $k = a$, $n = 1$, отсюда

$$S_{\text{п}} = av_{\text{л}}\tau.$$

По значениям S_{Π} , меняющимся по времени развития пожара τ , в масштабе строится зависимость $S_{\Pi} = f(\tau)$, которая называется *графиком распространения пожара*.

4.2. Основные стадии внутреннего пожара

Рассмотрим наиболее общий случай развития пожара в здании с горением твердых горючих материалов (ТГМ), равномерно распределенных по поверхности пола, внутри помещения обычного типа с начальной температурой среды 20°C .

Помещение обычного типа — это помещение малых размеров с высотой потолка 3–6 м, площадью 20–30 м², с пожарной нагрузкой типа древесины.

Большинство пожаров ТГМ начинаются, как правило, с возникновения от источника зажигания на небольшом участке открытого пламенного горения или тления. Сначала пламя медленно распространяется по поверхности горючего материала. Вокруг зоны горения сразу возникает конвективный газовый поток, обеспечивающий необходимый газообмен. Поверхность горючего материала под зоной горения и перед ней начинает прогреваться на большую глубину. Размер факела пламени увеличивается в объеме и продолжает распространяться на прогретые до температуры воспламенения слои горючего материала. Одновременно интенсифицируются газообмен и лучистый поток тепла из зоны горения в окружающее пространство. Эта фаза пожара (I) перехода загорания в пожар длится 1–3 мин (рис. 7).

Затем начинается этап развития пожара (фаза II). Возникает новый фактор — медленное повышение температуры среды в помещении. Весь описанный выше процесс повторяется с большей интенсивностью. Этот этап длится примерно 5–10 мин.

Начинается фаза III пожара — бурный процесс нарастания всех рассмотренных выше параметров. Температура в помещении поднимается до $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Начинается фаза объемного развития пожара, когда пламя заполняет практически весь объем помещения, а процесс распространения пламени происходит уже не по поверхности материалов, а дистанционно, под действием конвективных и лучистых потоков тепла воспламеняются отдельно стоящие предметы и горючие материалы.

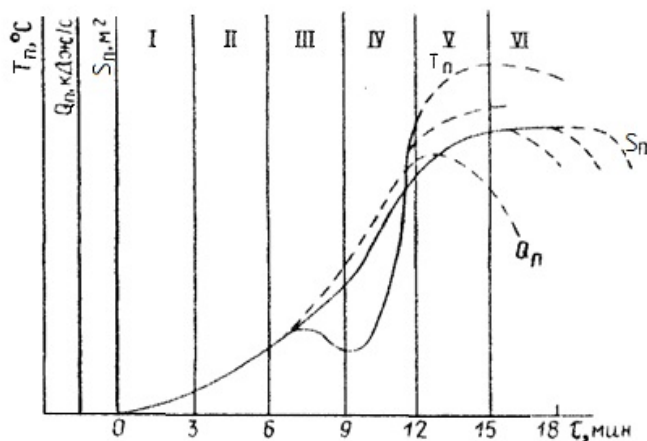


Рис. 7. Изменение основных параметров пожара во времени

При температуре газовой среды в помещении 300°C происходит разрушение остекления. Огонь вырывается из проемов наружу. Скачком изменяется газообмен: интенсифицируются отток горячих продуктов горения и приток свежего воздуха в помещение (фаза IV). При этом температура в помещении может несколько снизиться, но резко возрастают другие параметры: скорость выгорания и скорость распространения горения, удельное и общее тепловыделение. Температура опять резко возрастает. Площадь пожара, скорость выгорания и степень задымления достигают максимума.

Параметры пожара стабилизируются. Эта фаза V наступает обычно на 20–25 мин и длится еще 20–30 мин и более.

Затем начинается фаза VI пожара, характеризующаяся постепенным снижением его интенсивности, так как основная часть пожарной нагрузки уже выгорела. Обугленный слой на поверхности материалов препятствует проникновению тепла и выходу летучих фракций. Верхний слой угля начинает гореть беспламенным горением, поглощая значительную часть кислорода из поступающего воздуха. Концентрация продуктов горения возрастает до предельного значения. Интенсивность теплообмена снижается из-за повышения оптической плотности среды (задымления).

Интенсивность горения медленно снижается. Площадь пожара не сокращается, она может расти или стабилизироваться, а площадь горения сокращается. Наступает фаза VII пожара – догорание, медленное тление, после чего через некоторое время пожар догорает и прекращается.

В настоящее время большинство объектов оборудуются автоматическими системами пожарной сигнализации и пожаротушения. Автоматические системы сигнализации должны срабатывать уже на стадии I развития пожара. Автоматические системы пожаротушения должны включаться на I или II фазе его развития. Тушение пожара передвижными силами начинается, как правило, через 10–15 мин после извещения, т. е. через 15–20 мин после его возникновения (III–V фазы).

4.3. Характерные схемы развития пожаров в зданиях различной планировки

Рассмотрим зависимость интенсивности развития пожара от вида и характера пожарной нагрузки, состояния горючих материалов и других факторов.

Если *горючий материал однороден и равномерно размещен* по площади пола, если в помещении нет ориентированных газовых потоков, то процесс горения будет распространяться равномерно во все стороны по форме, близкой к круговой.

Чем *более горючий материал* составляет пожарную нагрузку, тем интенсивнее развитие пожара.

Чем *выше теплота сгорания* горючего материала, тем больше скорость роста тепловыделения на пожаре, выше скорость роста температуры пожара.

Чем *мельче частицы материала* (больше дисперсность), тем больше его скорость выгорания.

Чем *менее компактно уложен материал*, тем больше коэффициент поверхности горения, тем легче поступает воздух в зону горения и интенсивнее выходят летучие фракции из горючего материала, тем выше линейная скорость распространения пожара и т. д.

Если пожарная нагрузка состоит из *неоднородных горючих материалов*, то характер развития пожара существенно изменится.

В этом случае необходимо учитывать доминирующее направление развития пожара, которое будет определять скорость распространения пожара, величину и форму его площади и другие параметры.

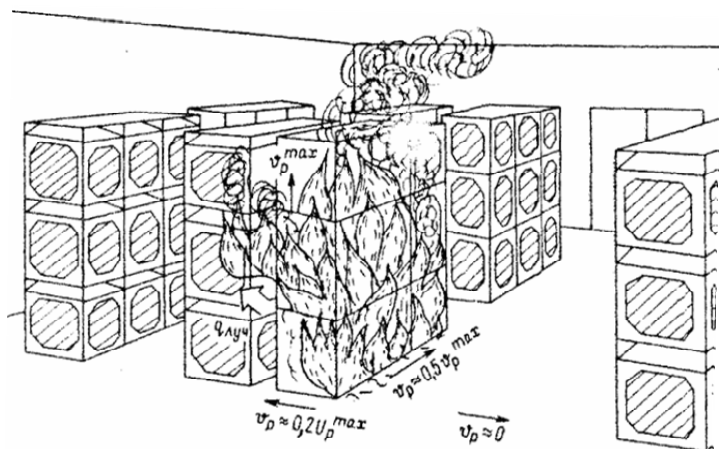


Рис. 8. Схема распространения пожара при неравномерном размещении однородной пожарной нагрузки

То же самое произойдет в случае, если *однородная пожарная нагрузка размещена неравномерно*. Особенно если некоторая часть горючих материалов расположена горизонтально, а значительная часть ГМ размещена вертикально (например, обшивка стен, книжные стеллажи и др.). При прочих равных условиях доминирующим направлением распространения горения будет вертикальное (рис. 8).

Рассмотрим некоторые простейшие схемы распространения и развития пожара, когда пожарная нагрузка неоднородна или размещена неправильно.

При равномерно расположенной разнородной пожарной нагрузке пожар будет распространяться быстрее по более легкогорючим материалам (бумага, ЛВЖ и т. д.).

Если *пожарная нагрузка размещена неравномерно и различается по структуре* (рис. 9), в реальных условиях процесс горения будет распространяться неравномерно и по направлению и по скорости.

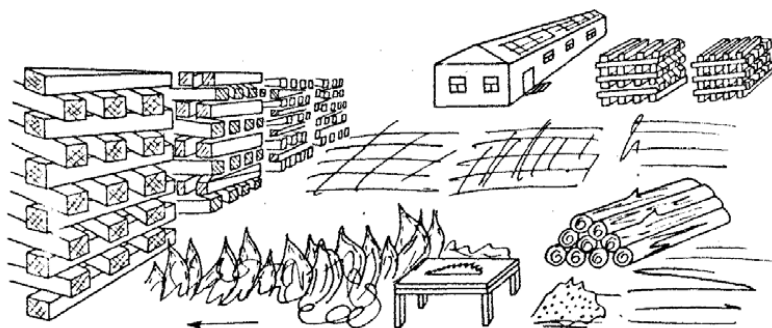


Рис. 9. Схема распространения пожара при неравномерно расположенной неоднородной нагрузке

При пространственном размещении (наиболее реальном) однородной пожарной нагрузки преимущество распространения пожара будет определяться направлением сил конвекции. Когда вектор распространения горения совпадает с вектором конвективных потоков, скорость распространения пожара увеличивается в 2–3 раза и более (и наоборот).

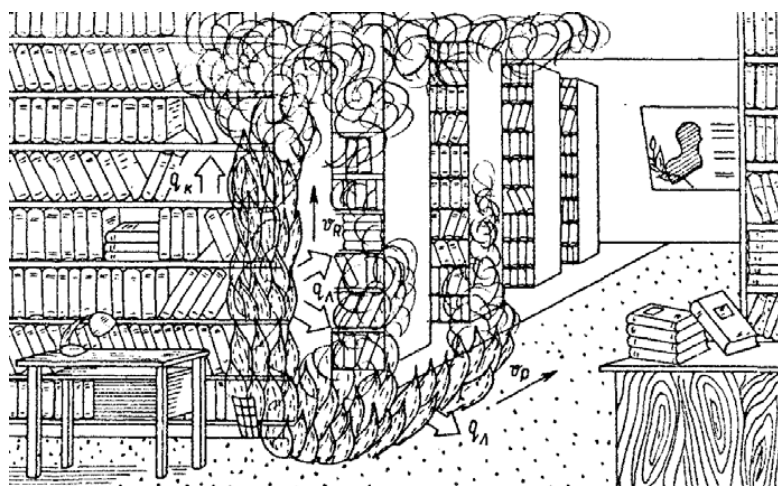


Рис. 10. Схема распространения пожара при наличии отделочных и легковоспламеняющихся материалов

Если в зоне горения находятся *неоднородные горючие материалы*, например, в книгохранилище выстлана ковровая дорожка (рис. 10), то пламя распространится по ней, как по специальному «пламяпроводу». Тогда, по законам конвективных газовых и тепловых потоков, пламя по стеллажу пойдет вверх, а по легкогорючей ковровой дорожке распространится до противоположной стороны книгохранилища. Если стеллажи отделаны лаком, красками, то по ним пламя будет распространяться еще быстрее.

4.4. Основные пути распространения пожаров за пределы очага возгорания

Как известно, пожары редко ограничиваются помещениями, где возникло горение. Если не принимаются меры по локализации и тушению пожара, то после разрушения остекления, прогорания дверей, изолирующих перегородок, перекрытий пожар перебрасывается за пределы одного помещения и начинает интенсивно распространяться дальше.

Обычно раньше всего пламя пожара выходит за пределы горящего помещения через оконные проемы, так как остекление окон разрушается при среднеобъемной температуре пожара 250–300° С через 10–15 мин после начала пожара. Языки пламени вместе с горячими продуктами горения вырываются из разрушенных оконных проемов, устремляются вверх и достигают оконных переплетов верхних этажей, которые могут также воспламениться.

При очень интенсивном горении пожар может переброситься на близрасположенное здание по механизму передачи лучистой энергии или от искр и головней.

Другим естественным и опасным путем распространения пожара являются открытые дверные проемы помещения, где возникло горение. Даже если двери плотно закрыты, их огнестойкость составляет 4–5 или 10–15 мин (это зависит от конструкции материала дверей, режима горения, характера размещения пожарной нагрузки, близости очага горения к двери и др.).

Другой путь распространения пожара за пределы помещения — это переход горения через вертикальные и горизонтальные огораживающие конструкции (рис. 11). Пожар редко переходит через

горизонтальные перегородки на нижние этажи зданий. Чаще всего пожар распространяется на верхние этажи.

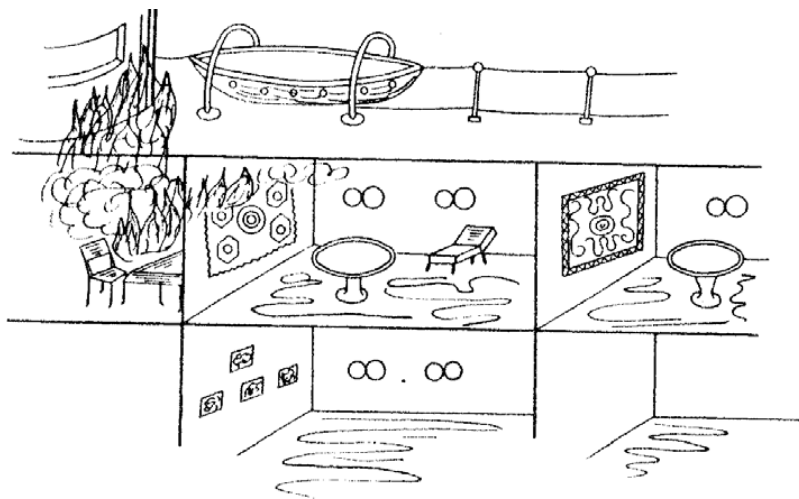


Рис. 11. Схема распространения пожара через ограждающие конструкции

Наиболее опасными путями распространения пожара являются различные пустоты в перекрытиях, вентиляционные каналы и т. п. В этих случаях продукты горения по законам естественной конвекции распространяются по таким каналам вверх. Скопление их с последующим внезапным воспламенением может вызвать взрыв с разрушением строительных конструкций и выбросом пламени в смежные помещения.

Замечено, что развивающиеся в помещениях пожары нередко сопровождаются объемным распространением горения, которое называют по-разному: объемной вспышкой, проскоком пламени и т. п. В зарубежной литературе это явление получило название «flash fire». Оно заключается в том, что при неполном сгорании или разложении полимерных материалов в объеме помещения накапливаются горючие газы, смешение которых с воздухом приводит к образованию горючих газозводушных смесей. Контакт таких смесей с пламенем пожара приводит к их интенсивному воспламенению.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные параметры, характеризующие развитие внутренних пожаров.
2. Как определяется скорость распространения внутреннего пожара?
3. Как определяется площадь внутреннего пожара?
4. Назовите основные стадии внутреннего пожара.
5. Опишите характерные схемы развития пожаров в зданиях различной планировки.
6. В чем заключается явление объемной вспышки?

5. Тепло- и газообмен при пожаре в помещении

5.1. Тепловой режим пожара

Выделяющееся при горении тепло является основной причиной развития пожара и возникновения многих сопровождающих его явлений. Возникновение и скорость протекания тепловых процессов зависят от интенсивности тепловыделения при пожаре.

Определить температуру пожара сложно как теоретически, так и экспериментально. Внутренний пожар — это более сложный случай процесса горения по сравнению с открытым пожаром. Объем, где происходит горение, ограничен, и не все тепло теряется безвозвратно. В общем случае тепловой баланс внутреннего пожара до некоторого момента может быть представлен следующим образом (кДж):

$$Q_{\text{п}} = Q'_{\text{пг}} + Q''_{\text{пг}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{гм}} + Q_{\text{л}},$$

где $Q_{\text{п}}$ — количество теплоты, выделяющейся на пожаре; $Q'_{\text{пг}}$ — тепло, содержащееся в продуктах горения, удаляющихся из помещения; $Q''_{\text{пг}}$ — тепло, содержащееся в продуктах горения, находящихся в помещении; $Q_{\text{к}}$ — тепло, передаваемое конвекцией и излучением из зоны горения к конструкциям и оборудованию помещения; $Q_{\text{гм}}$ — тепло, передаваемое конвекцией и излучением из зоны горения к горючим материалам; $Q_{\text{л}}$ — тепло, излучаемое из зоны горения за пределы помещения (через проемы и обрушения).

Как показывает практика, $Q_{\text{л}}$ составляет 3–4% от $Q_{\text{п}}$; $Q_{\text{к}}$ — 6–8%; $Q_{\text{гм}}$ — 1,5–3%.

Величины $Q'_{\text{пг}}$ и $Q_{\text{л}}$ не приводят к повышению температуры в зоне пожара, так как в обоих случаях тепло уходит за пределы помещения.

Количественно малая величина $Q_{\text{гм}}$ качественно идет на нагрев горючего материала, соответственно, этот тепловой поток один из самых опасных. Следовательно, если обеспечить условие $Q_{\text{гм}} = 0$, практически можно локализовать и потушить пожар.

$Q_{\text{к}}$ — также очень опасный тепловой поток, так как повышение температуры несущих элементов строительных конструкций приводит к снижению их прочности и обрушению.

$Q''_{\text{пг}}$ — это тепло, которое распределяется по всему помещению и в основном определяет температуру пожара ($T_{\text{п}}$).

Если принять рассмотренные тепловые потери ($Q'_{\text{пг}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{гм}} + Q_{\text{л}}$) как некоторую долю m от $Q_{\text{п}}$, то можно составить упрощенную формулу теплового баланса

$$Q_{\text{п}} = Q''_{\text{пг}} + mQ_{\text{п}}.$$

Если подставить в эту упрощенную формулу теплового баланса известные физические соотношения, то получим

$$\beta Q_{\text{н}} v'_{\text{м}} S_{\text{п}} = v'_{\text{м}} S_{\text{п}} c_{\text{р}} [V_{\text{пг}} + V_0 (\alpha - 1)] (T_{\text{п}} - T_{\text{н}}) + m \beta Q_{\text{н}} v'_{\text{м}} S_{\text{п}},$$

где $T_{\text{п}}$ — температура пожара; $T_{\text{н}}$ — начальная температура окружающей среды; $c_{\text{р}}$ — удельная теплоемкость выходящих газов (продуктов горения) при $T_{\text{п}}$, кДж/(кг·град); $V_{\text{пг}}$ — удельная масса выходящих газов (продуктов горения) на единицу массы сгоревшей пожарной нагрузки, кг/кг; V_0 — удельная масса воздуха в помещении, не участвующего в горении, на единицу массы пожарной нагрузки, кг/кг; α — коэффициент избытка воздуха (см. п. 5.2).

После преобразования полученного выражения можно определить среднеобъемную температуру в помещении при пожаре

$$T_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{н}} (1 - m) \beta}{c_{\text{р}} [V_{\text{пг}} + V_0 (\alpha - 1)]} + T_{\text{н}}.$$

В этом выражении величины $c_{\text{р}}$ и m неизвестны, поэтому уравнение решают методом последовательных приближений. Отметим, что при пожарах распределение температуры неравномерно по объему и нестационарно во времени. На рис. 12 показано температурное поле пожара в помещении объемом 100 м³ на 15-й минуте горения бензина на площади 2 м².

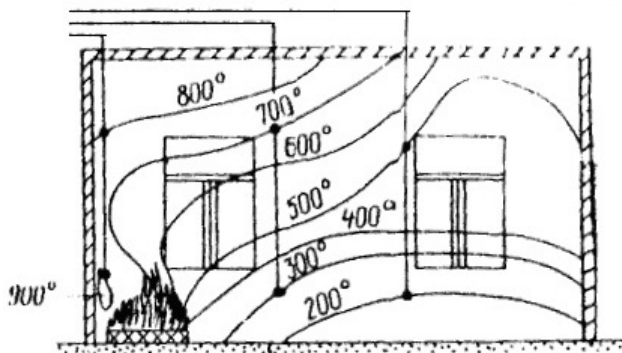


Рис. 12. Температурное поле внутреннего пожара

5.2. Механизм и параметры газообмена при пожаре в помещении

Рассмотрим развитие пожара в некотором помещении (рис. 13) с момента его загорания.

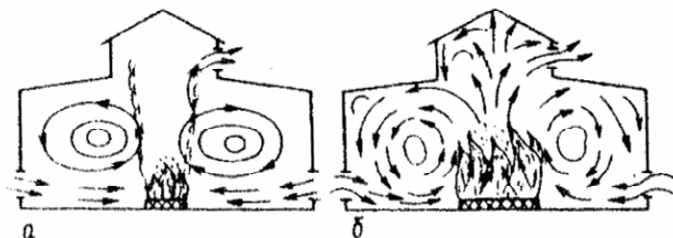


Рис. 13. Схема газовых потоков в помещении при пожаре:
а — начальная стадия; б — развившийся пожар

В начальной стадии горение происходит за счет воздуха, уже находящегося в помещении. Воздух, нагретый до высокой температуры в зоне горения, поднимается вверх, а к очагу пожара подтекают новые порции более холодного воздуха. На ранней стадии такая тепловая струя затухает, не достигнув перекрытия помещения.

При увеличении площади пожара мощность тепловой струи также увеличивается. Горячие газы и продукты горения вперемешку с холодным воздухом частично растекаются под перекрытием,

частично удаляются через проемы. Часть охлажденного воздуха опускается вдоль стен вниз и попадает в зону химических реакций, нагревшись, снова поднимается вверх. В помещении создается непрерывная циркуляция газовых потоков (газообмен), температура постепенно возрастает.

Поскольку объем нагретых газов больше объема холодных, то часть газов будет вытесняться. То есть масса газов будет постепенно уменьшаться по мере роста температуры. Взамен из окружающей атмосферы через проемы поступает свежий воздух.

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

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}^{\Phi}}{G_{\text{в}}^{\text{ТР}}}.$$

Секундный массовый расход воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания пожарной нагрузки при заданной площади пожара $S_{\text{п}}$ и установившейся удельной массовой скорости выгорания $v'_{\text{м}}$, можно рассчитать по формуле

$$G_{\text{в}}^{\text{ТР}} = v'_{\text{м}} S_{\text{п}} V_{\text{в}}^0 \rho_{\text{в}},$$

где $V_{\text{в}}^0$ — объем воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания 1 кг горючего вещества, м³/кг; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м³.

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

$$G_{\text{в}}^{\Phi} = \mu v_{\text{в}} S_{\text{пр}} \rho_{\text{в}},$$

где μ — коэффициент расхода проема, зависящий от его формы ($\mu = 0,6-0,7$); $v_{\text{в}}$ — скорость притока воздуха, м/с; $S_{\text{пр}}$ — общая площадь приточных проемов, м².

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

Фактическая интенсивность газообмена определяется соотношением

$$I_{\text{г}}^{\Phi} = \frac{\alpha v_{\text{в}} S_{\text{пр}} \rho_{\text{в}}}{S_{\text{п}}}.$$

Требуемая интенсивность газообмена определяется соотношением

$$I_{\Gamma}^{\text{тп}} = \frac{G_{\text{в}}^{\text{тп}}}{S_{\text{п}}} = v_{\text{м}}' V_{\text{с}}^0 \rho_{\text{с}}.$$

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

5.3. Плоскость равных давлений (нейтральная зона)

Основные закономерности газообмена на пожаре рассмотрим на примере помещения, показанного на рис. 14. Поскольку пожар является нестационарным физико-химическим процессом, сделаем некоторые допущения:

- температура газов в помещении выше, чем температура окружающего воздуха, и с течением времени не меняется;
- ветровые нагрузки на здание отсутствуют;
- площади проемов (1, 2) с течением времени не изменяются;
- масса поступающих в помещение газов равна массе удаляемых газов.

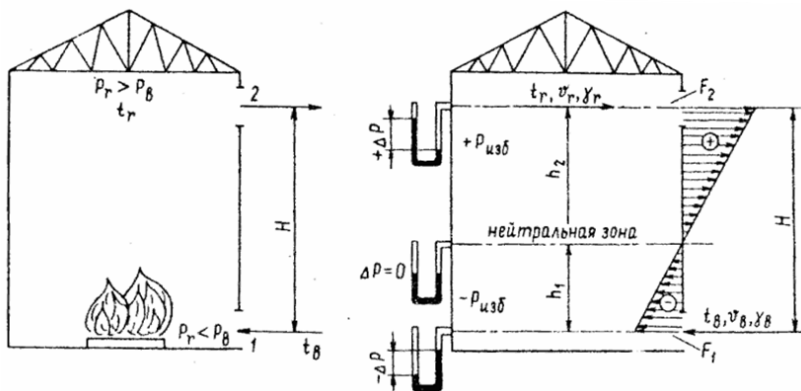


Рис. 14. Схема распределения статического давления в помещении при пожаре

При пожаре через нижний проем 1 в помещение будет входить более плотный окружающий воздух и выталкивать по закону Ар-

химеда через проем 2 горячий газ (смесь продуктов горения с воздухом). При этом давление в нижней зоне помещения меньше, а в верхней — больше давления окружающей среды. Если объем помещения мысленно рассеять по высоте множеством горизонтальных плоскостей, то обязательно найдется такая плоскость, в которой избыточное давление будет равно нулю. Эта плоскость называется плоскостью равных давлений, или нейтральной зоной.

Для расчета положения нейтральной зоны определим расстояния h_1 и h_2 от центров нижних и верхних проемов до плоскости равных давлений.

Абсолютные избыточные давления в центре нижних и верхних отверстий равны:

$$p_1 = h_1(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}});$$

$$p_2 = h_2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}}),$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м³; $\rho_{\text{г}}$ — плотность продуктов горения (дыма), кг/м³.

Избыточные давления создают скоростные напоры в отверстиях

$$p_1 = \frac{v_1^2 \rho_{\text{в}}}{2g};$$

$$p_2 = \frac{v_2^2 \rho_{\text{г}}}{2g}.$$

где v_1 и v_2 — соответственно скорости потоков газов в нижнем и верхнем отверстиях; g — ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

После преобразований получим соотношения:

$$\frac{v_1^2 \rho_{\text{в}}}{2g} = h_1(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}});$$

$$\frac{v_2^2 \rho_{\text{г}}}{2g} = h_2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}});$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}}.$$

При установившемся режиме газообмена масса воздуха, поступающего в помещение через отверстие 1, равна массе газов, уходящих через отверстие 2, т. е. $G_1 = G_2$:

$$\mu_1 f_1 v_1 \rho_{\text{в}} = \mu_2 f_2 v_2 \rho_{\text{г}},$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_2 f_2 \rho_{\Gamma}}{\mu_1 f_1 \rho_{\text{в}}},$$

где f_1 и f_2 — соответственно площадь нижнего (приточного) и верхнего (вытяжного) отверстий; μ_1 и μ_2 — соответственно коэффициенты расхода нижнего и верхнего отверстий.

Используя это выражение, получим

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{\mu_2 f_2 \rho_{\Gamma}}{\mu_1 f_1 \rho_{\text{в}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\Gamma}} = \left(\frac{\mu_2 f_2}{\mu_1 f_1} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{в}}}.$$

Значения коэффициентов μ_1 и μ_2 даются в гидравлических справочниках и при одинаковой форме отверстий могут быть приняты равными ($\mu_1 = \mu_2$), тогда

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{в}}}.$$

Так как $h_1 + h_2 = H$, то можно определить расстояния от оси верхних или нижних отверстий до нейтральной зоны:

$$h_1 = \frac{H}{\left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\Gamma}} + 1};$$

$$h_2 = \frac{H}{\left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{в}}} + 1}.$$

Когда газообмен осуществляется через один дверной (оконный) проем или через несколько проемов, расположенных на одном уровне, то в этом случае через верхнюю часть проема удаляются продукты горения, а нижняя часть работает на приток свежего воздуха (рис. 15).

Положение нейтральной зоны в этом случае может быть рассчитано по следующим формулам:

$$h_1 = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\Gamma}} + 1}}},$$

$$h_2 = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{в}}} + 1}}},$$

где $H_{\text{пр}}$ — высота проема.

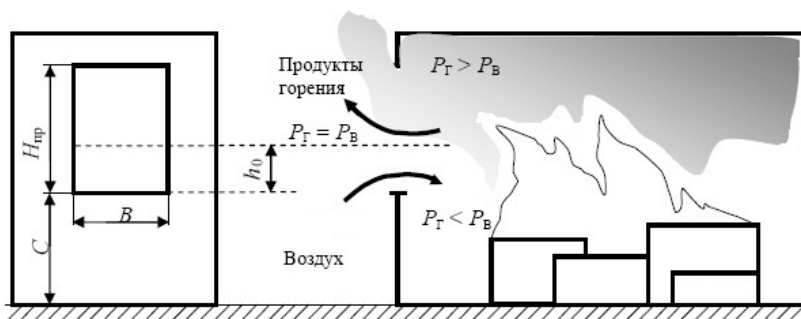


Рис. 15. Схема газообмена при внутренних пожарах

Количество дыма, выделяемого при пожаре в единицу времени, можно определить по уравнению

$$V_d = \varphi v'_m V_{гп} \frac{T_{п}}{T_o},$$

где φ – коэффициент пропорциональности; $V_{г}$ – удельное количество дыма, образующееся при сгорании 1 кг горючего, $\text{м}^3/\text{кг}$; $T_{п}$ и T_o – температура пожара и начальная температура окружающей среды соответственно, К.

Количество дыма, удаляемого из помещения в единицу времени, определим по формуле

$$V_{уд} = \mu_2 f_2 \sqrt{2gh_2 \frac{\rho_в - \rho_г}{\rho_в}}.$$

Как видно из всех представленных формул, положение нейтральной зоны можно менять путем изменения соотношения между площадями нижних и верхних проемов, т. е. нейтральную зону можно «поднять» вверх с целью снижения задымленности и уменьшения температуры в нижней рабочей зоне при тушении пожаров.

В помещениях с большой интенсивностью газообмена и высоким температурным режимом нейтральная зона располагается сравнительно высоко. Поток холодного воздуха велик, и в нижней части помещения возможно пребывание людей. В этих помещениях сравнительно быстро можно создать благоприятную для тушения обстановку: вскрыть или закрыть проемы, ввести в действие дымососы, работать стволами через проемы.

5.4. Классификация внутренних пожаров по условиям газо- и теплообмена

В зависимости от соотношения массовой скорости образования в помещении горючих газов (в результате пиролиза или испарения горючего) и скорости их сгорания в смеси с поступающим воздухом различают два режима внутренних пожаров:

- пожары, регулируемые вентиляцией (ПРВ),
- пожары, регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН).

Пожары, регулируемые вентиляцией (ПРВ), протекают при ограниченном содержании кислорода в газовой среде помещения и избытке горючих веществ и материалов.

Параметры такого пожара определяются интенсивностью газообмена, поскольку окислителя не хватает для полного сгорания горючих веществ и материалов. При длительном развитии пожара в режиме ПРВ в помещении накапливаются несгоревшие газы. Вскрытие проемов приводит к их разбавлению воздухом, образованию и воспламенению горючей смеси — объемной вспышке.

Пожары, регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН), протекают при избытке воздуха для горения.

Развитие такого пожара зависит от количества пожарной нагрузки. По своим параметрам такие пожары приближаются к пожарам на открытом пространстве. Если при развитии пожара в режиме ПРН увеличить приток воздуха в помещение, то температура газовой среды понизится, так как наружный воздух является значительно более холодным. Вскрытие проемов, откачивание дыма при ПРН также приводит к снижению температуры пожара.

При горении штабеля древесины режим пожара можно определить по параметру Φ :

$$\Phi = \frac{\rho_v S_{\text{пр}} \sqrt{gH}}{S_r},$$

где S_r — площадь поверхности горения, м².

Если $\Phi \leq 0,235$ — пожар, регулируемый вентиляцией, $\Phi \geq 0,29$ — пожар, регулируемый нагрузкой. При $0,235 < \Phi < 0,29$ — комбинированный режим пожара, когда в помещении имеются одновременно участки, где приток воздуха обеспечивает режим ПРН (обычно вблизи проемов), и участки, на которых режим ПРВ.

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

Открытые пожары развиваются при наличии в помещении полностью или частично открытых отверстий. Горение быстро распространяется преимущественно в сторону открытых отверстий, через которые происходит газообмен с окружающей средой. Такие пожары по своим параметрам близки к пожарам на открытом пространстве.

Газообмен через проемы оказывает влияние на развитие пожара в том случае, когда площадь пожара в 4–6 раз превышает площадь приточной части проемов. Если площадь пожара в 10 раз превышает площадь приточной части проемов, происходит резкое замедление процесса развития пожара.

К **закрытым пожарам** относят такие, которые протекают при закрытых отверстиях в ограждениях. Газообмен осуществляется через неплотности в ограждениях (щели в дверных проемах и оконных рамах, отключенная система вентиляции).

При закрытых пожарах в течение первых нескольких минут коэффициент избытка воздуха α резко уменьшается в связи с расходом кислорода из воздуха, находящегося в помещении. Последующий период характеризуется сравнительной стабильностью, так как устанавливается газообмен через неплотности. В последующем возможен рост α за счет уменьшения скорости выгорания материала, т. е. переход в режим тления, или в результате вскрытия дополнительных проемов (лопнули стекла, прогорели двери).

Из всего сказанного следует, что газообмен является основным фактором в развитии пожаров внутри зданий, так как он определяет скорость выгорания и скорость распространения горения (площадь пожара), скорость движения газов и абсолютные значения температуры в помещении. В то же время газообмен зависит от площади проемов и их расположения, температуры пожара.

При тушении пожаров надо учитывать эту взаимную зависимость, чтобы не вызвать нежелательные последствия. Например, иногда на пожарах в целях удаления дыма и ввода стволов открывают все имеющиеся проемы. Это приводит к интенсивному разви-

тию пожара, а сил и средств, чтобы его сдерживать, уже оказывается недостаточно.

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

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите тепловой баланс при внутреннем пожаре.
2. Опишите механизм газообмена при внутреннем пожаре.
3. Что такое коэффициент избытка воздуха?
4. Как определяется положение нейтральной зоны при внутренних пожарах?
5. В чем особенности пожаров, регулируемых вентиляцией?
6. Охарактеризуйте особенности пожаров, регулируемых пожарной нагрузкой.

Модуль III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ

6. Тепловая теория и способы прекращения горения

6.1. Тепловая теория прекращения горения

Тепловая теория прекращения горения является наиболее распространенной. Суть ее сводится к тому, что при нарушении условий теплового равновесия в зоне горения протекание соответствующих химических реакций становится невозможным и процесс горения прекращается. Это происходит тогда, когда температура пламени $T_{\text{пл}}$ будет снижена до некоторого критического значения $T_{\text{кр}}$, т. е.

$$T_{\text{кр}} = T_{\text{пл}} - \Delta T.$$

Максимально возможную величину снижения температуры пламени можно определить по формуле

$$\Delta T \approx \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E},$$

где $R = 4,19$ кДж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $T_{\text{ад}} = 2300$ К – адиабатическая температура пламени; $E = 125000$ кДж/моль – энергия активации.

После подстановки данных получим значение критической температуры потухания $T_{\text{кр}}^{\text{ад}} = 1240$ К $\approx 1000^\circ$ С.

Температура кинетического пламени значительно меньше адиабатической из-за теплопотерь из зоны горения. В диффузионном пламени, которое наиболее часто встречается на пожаре, доля тепловых потерь еще больше. Поэтому реальная температура диффузионного пламени примерно на 40–45% ниже $T_{\text{ад}}$, т. е.

$$T_{\text{кр}} < T_{\text{кр}}^{\text{ад}}.$$

Таким образом, задача сводится к снижению температуры в зоне химических реакций до температуры потухания путем нарушения теплового равновесия в зоне горения.

Нарушение теплового равновесия в зоне горения можно осуществить либо снижением интенсивности тепловыделения ниже некоторого предельного значения, либо повышением интенсив-

ности теплоотвода, либо одновременно двумя этими путями. В общем случае для прекращения горения необходимо, чтобы скорость тепловыделения в очаге пожара была меньше скорости теплоотвода от очага в окружающую среду.

Интенсивность процесса тепловыделения во фронте пламени q_1 зависит от вида горючего, его концентрационного состава, температуры пламени.

Интенсивность суммарного процесса теплоотвода от фронта пламени q_2 по механизму лучистой теплопередачи и передачи тепла конвекцией прямо пропорционально зависит от температуры пламени.

Приравнивая уравнение для тепловыделения $q_1 = f(T)$ к уравнению для теплоотвода $q_2 = f(T)$, можно найти как фактическую, так и критическую температуру потухания пламени. Однако указанные зависимости достаточно сложны для аналитического решения.

Графически температуру диффузионного пламени можно найти как численное значение точки пересечения кривых $q_1 = f(T)$ и $q_2 = f(T)$ (рис. 16). В точке пересечения этих кривых $q_1 = q_2$. При этом точке с касания кривых будет соответствовать температура самовоспламенения $T_{св}$, а температура пламени $T_{пл}$ будет соответствовать точке 1 пересечения этих же кривых.

Изменяя интенсивность тепловыделения или теплоотвода в зоне горения, можно довести систему до состояния, соответствующего критическим условиям.

Например, увеличивая теплоотвод (рис. 16), мы получаем некоторую новую кривую $q_2' = f(T)$, при этом кривые $q_1 = f(T)$ и $q_2' = f(T)$ имеют две общие точки: точку пересечения a' в области низких температур (соответствует медленному окислению горючего, горения нет) и точку П касания кривых. В точке П система находится в относительно устойчивом положении, при котором повышение температуры системы ведет к ее возврату в прежнее состояние стабильного горения, а малейшее понижение температуры ведет к неизбежному потуханию пламени (система получит только одну точку пересечения в области низких температур). Таким образом, точка П соответствует критическим условиям потухания пламени, а температура $T_{пот}$ называется условно температурой потухания пламени.

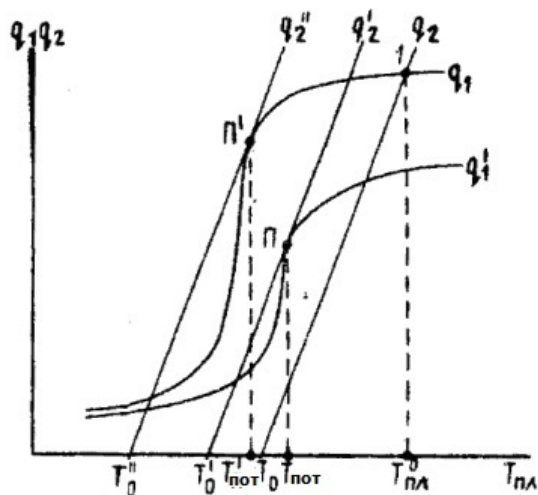


Рис. 17. Изменение скорости выделения и отвода тепла в зоне горения в зависимости от температуры (уменьшение тепловыделения)

6.2. Способы прекращения процессов горения на пожаре

Одним из наиболее доступных способов прекращения горения является *снижение температуры* в зоне реакции и в окружающем пространстве. Для этого необходимо применять средства, снижающие интенсивность тепловыделения в зоне реакции горения или увеличивающие теплоотдачу из этой зоны.

Для отвода тепла из зоны горения можно вводить вещества, имеющие низкую температуру, например азот, гелий или аргон в жидком состоянии (их температура кипения составляет $-195,8$; $-268,9$; $-185,9$ ° С соответственно). Такое тушение принципиально возможно, но практически мало реализуемо.

Увеличить теплоотвод из зоны горения можно также чисто механическим путем, например внеся во фронт пламени огнетушащее вещество с большой теплоемкостью и (или) с развитой поверхностью теплопоглощения (это могут быть металлическая стружка, сетка и т. д.). Данный принцип прекращения горения используется в специальных устройствах — огнепреградителях, которые предотвращают распространение горения, например, в дыхательных устройствах резервуаров и газовых магистралях.

Теплоотдачу можно увеличить путем введения в пламя теплоемкого продукта с высокой степенью дисперсности, например огнетушащего порошка или обычного песка. Отметим, что при гашении пожаров порошками механизм увеличения теплоотдачи работает, но не является доминирующим.

Увеличить теплоотдачу пламени можно путем введения в зону горения веществ, изменяющих цвет пламени и делающих его более ярким, так как при одинаковой температуре в зоне горения лучистый поток больше от пламени, которое имеет цвет (в частности, содержит продукты неполного сгорания). При этом возрастают теплотраты на излучение. Соответствующая плотность теплового потока имеет величину

$$q_{\text{изл}} = \epsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_{\text{п}}^4,$$

где $\epsilon_{\text{пр}}$ — степень черноты пламени; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Больцмана, Вт/(м² К⁴); $T_{\text{п}}$ — температура пламени, К.

Увеличение лучистого потока приведет к нагреванию горючего и соответствующему увеличению испарения или выхода газообразных продуктов разложения. Последнее обстоятельство обычно приводит к росту тепловыделения, поэтому такой путь нарушения теплового баланса можно считать сугубо теоретическим.

Обычно для отвода тепла на практике применяют вещества, имеющие большую теплоту фазового перехода, например воду или твердый диоксид углерода. Вода, попадая в зону горения, нагревается и, испаряясь, отбирает значительное количество энергии. Твердый диоксид углерода образуется из жидкости при выходе через сопло огнетушителя и имеет температуру -73°C , что приводит к снижению температуры в зоне горения. В процессе испарения диоксида углерода в зоне горения дополнительно поглощается большое количество энергии.

Рассмотрим способы *снижения тепловыделения* в зоне горения.

При кинетическом горении газозвоздушных систем концентрация горючего и окислителя в зоне реакции определяется условиями смесеобразования. Концентрация компонентов изменяется при изменении скорости поступления горючего, окислителя или инертных добавок в зону, в которой непосредственно происходит образование смеси.

При диффузионном горении концентрация компонентов горючей смеси в зоне реакции горения зависит от ряда условий, таких как содержание кислорода в воздухе, который поступает в зону реакции горения, и скорость поступления горючих паров или газов в эту зону. В связи с этим для снижения концентрации компонентов горючей смеси в зоне реакции можно применить два способа.

Первый способ — изменить состав воздуха, который поступает в зону реакции горения, снизив в нем содержание кислорода до критического значения, или разбавить газообразные продукты, которые поступают в зону реакции, инертными добавками. Такой метод прекращения горения получил название *флегматизации*, или разбавления.

Второй способ — прекращение (уменьшение) до критического значения количества окислителя (продуктов испарения горючего), который поступает в зону реакции горения, путем изоляции компонентов горючей смеси друг от друга или поверхности горючего от теплового влияния зоны горения. Такой метод прекращения горения называется *изоляция*. Этот способ применим только тогда, когда это достижимо технически (закрытие вентилей на газопроводах, покрытие небольших емкостей с ГЖ металлическими листами и др.).

Частным случаем этого метода является тушение пожаров в резервуарах с горючей жидкостью путем ее перемешивания. Если в нижних слоях жидкости температура меньше, чем температура вспышки этой жидкости, интенсивным перемешиванием более холодные слои перемещаются вверх резервуара, что приводит к прекращению горения.

Интенсивность процессов горения, например, в технологических установках (топках, камерах сгорания и др.) зависит от давления. Снизив давление до определенного значения, можно настолько уменьшить число молекул в единице объема зоны реакции, что горение прекратится.

Химические способы тушения пожаров связаны с *торможением (ингибированием)* скорости реакции окисления путем снижения концентрации молекул горючего и окислителя при введении разбавляющих их реагентов. Вещества, которые способны тормозить

реакцию горения, называются *ингибиторами горения* (как правило, это инертные газы). Попадая в зону реакции, эти газы снижают концентрацию молекул горючего и окислителя в единице объема, что приводит к снижению скорости тепловыделения и температуры в зоне горения.

Таким образом, основные способы прекращения горения на пожаре могут быть представлены в виде систематизированной таблицы (табл. 3).

6.3. Основные принципы тушения пожаров различных веществ

На практике применяются *два основных способа подачи огнетушащих веществ*:

- в объем зоны горения («тушение по объему»),
- на поверхность горючего («тушение по поверхности»).

При объемном тушении огнетушащее вещество может подаваться локально, т. е. непосредственно в зону горения (над локальным очагом пожара), в факел газового фонтана или в объем помещения (тушение методом затопления). В обоих случаях горение прекращается, когда концентрация подаваемого вещества становится равной огнетушащей и температура пламени снижается до температуры потухания.

При тушении по поверхности температура пламени на поверхности горючего достигает температуры потухания, и горение прекращается. Массовая скорость выгорания падает ниже предельного значения, при котором концентрация горючих газов или паров над поверхностью становится меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПВ).

Для прекращения горения газов необходимо и достаточно отобрать непосредственно от зоны горения такое количество теплоты, чтобы температура факела понизилась до температуры потухания. Охлаждать исходное горючее или окислитель в данном случае бесполезно, так как газы воспламеняются и горят при любой реально достижимой температуре. За температуру потухания принимается адиабатическая температура горения предельно обедненной газовой смеси — смеси на НКПВ. Охлаждать необходимо факел пламени, т. е. отводить тепло непосредственно из зоны горения.

Таблица 3

Способы прекращения горения на пожаре

Снижение тепловыделения			Повышение теплоотдачи			
Изменение концентрации реагентов в зоне реакции	Снижение давления в зоне реакции	Химическое торможение скорости реакции	Повышение коэффициента теплопередачи	Повышение степени черноты пламени в зоне реакции (увеличение излучающей способности)	Снижение температуры окружающей среды	
Разведение системы одним из компонентов или прекращение доступа другого компонента (изоляция)	Прекращение доступа одного из компонентов горючей смеси в технологических установках	Введение в зону реакции химических активных ингибиторов	Введение в зону реакции теплостойких компонентов (металлическая сетка, огнепреградители, перфорация)	Введение в зону горения веществ, изменяющих цвет пламени и деформирующих его более ярким	Введение веществ с высокой теплоемкостью; физическое отделение горючей смеси от фронта пламени	

На тушение газового фонтана подавать огнетушащие вещества в зону горения можно различными техническими средствами как извне, так и вместе с потоком горючего или окислителя. Например, воду можно подавать извне лафетными стволами, автомобилями газовойдынного тушения, а также закачкой внутрь фонтанирующей скважины. Наиболее эффективным способом тушения пламени газового фонтана является импульсная (залповая) подача огнетушащего порошка в объем зоны горения.

Необходимым условием *для тушения горючей жидкости* также является прекращение горения в газовой фазе. Если удастся создать условия, требуемые для потухания пламени во всем объеме зоны горения одновременно, то (при отсутствии внешних источников зажигания и температуре окружающей среды ниже температуры самовоспламенения) этого будет также достаточно для тушения пожара. Это достигается подачей огнетушащих веществ объемного или объемно-поверхностного действия (газовых или порошковых составов) различными техническими средствами либо непосредственно в зону горения, либо в объем помещения (газовые или аэрозолеобразующие составы). Вместе с тем прекратить горение жидкости можно, уменьшая скорость испарения путем отвода тепла не от пламени, а от поверхностного слоя. По мере уменьшения концентрации горючего в зоне горения температура пламени понижается. Если температуру поверхности понизить до температуры вспышки, концентрация горючего над поверхностью упадет до нижнего концентрационного предела, температура пламени достигнет температуры потухания, и горение прекратится.

Условием, необходимым и достаточным для тушения жидкости охлаждением поверхности, является понижение ее температуры от температуры кипения до температуры вспышки. Физически это означает, что массовую скорость выгорания надо уменьшить до такого минимального значения, при котором концентрация пара над поверхностью не превышает нижний концентрационный предел распространения пламени. Для этого интенсивность теплоотвода должна быть не ниже интенсивности теплового потока, затрачиваемого в единицу времени на образование горючей концентрации пара над поверхностью жидкости и формирование прогорелого слоя.

Гомогенное (пламенное) горение *твердых горючих материалов* (ТГМ) обусловлено образованием горючих газов в результате термического разложения вещества — пиролиза. Для этого необходимо, чтобы скорость выделения газообразных продуктов пиролиза и притока воздуха были достаточны для образования над поверхностью материала горючей смеси, т. е. смеси, в которой концентрация горючего газа не ниже НКПВ. Непрерывное поступление горючих паров и газов в зону горения поддерживается интенсивным тепловым потоком к поверхности ТГМ от собственного пламени и внешних источников.

Пиролиз некоторых ТГМ начинается после плавления и протекает в тонком поверхностном слое. Как правило, это линейные нешитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Такие материалы, подобно жидкости, выгорают без остатка.

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древеснонаполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, шитые полимерные материалы — реактопласты. Для них характерны два вида горения — гомогенное (пламенное) и гетерогенное (тление). Их соотношение зависит от интенсивности тепло- и газообмена у поверхности горения. В процессе горения углистый слой аккумулирует значительное количество тепла. Температура его поверхности достигает 600–700° С, что является достаточным для зажигания горючих газовых смесей. В результате для ТГМ снижение температуры горения до температуры потухания без охлаждения прогретого слоя является условием тушения необходимым, но недостаточным, поскольку прогретый слой конденсированной фазы (твердого вещества или расплава) способен в течение некоторого времени поставлять нагретые продукты разложения и испарения в зону горения и являться источником их воспламенения. Поэтому при их тушении рассматривают еще одно достаточное условие — снижение температуры прогретого слоя до температуры начала пиролиза или плавления.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите суть тепловой теории прекращения горения.
2. Каковы основные способы прекращения горения на пожаре путем увеличения интенсивности теплоотвода?
3. Каковы основные способы прекращения горения на пожаре путем снижения интенсивности тепловыделения?
4. Опишите основные способы подачи огнетушащих средств.
5. Назовите необходимое условие для прекращения горения газов.
6. Назовите необходимое условие для прекращения горения горючих жидкостей.
7. Назовите необходимое условие для прекращения горения ТГМ.

7. Огнетушащие вещества, их свойства, область применения

7.1. Классификация огнетушащих веществ

Под *огнетушащими средствами* (ОС) понимают различные вещества и материалы, с помощью которых непосредственно создаются различные условия прекращения горения.

Все ОС классифицируются по двум признакам: агрегатному состоянию и механизму прекращения горения.

По агрегатному состоянию они подразделяются

- на жидкие (вода, водные растворы смачивателей и т. д.);
- пенные (воздушно-механические и химическая пены);
- порошковые составы;
- сыпучие материалы (песок, земля, специальные составы и т. д.);
- газообразные (нейтральные газы).

По механизму прекращения горения все ОС подразделяются

- на охлаждающие зону химической реакции или горящие вещества (вода, водные растворы смачивателей, твердый диоксид углерода и т. д.);
- разбавляющие вещества в зоне реакций горения (нейтральные газы, водяной пар и т. д.);
- изолирующие горючие вещества от зоны горения (химическая и воздушно-механическая пены, негорючие сыпучие материалы, листовые материалы и т. д.);

- химически тормозящие (ингибирующие) реакцию горения (хладоны).

Все огнетушащие составы оказывают комбинированное воздействие на процесс горения. Вода, например, может охлаждать и изолировать (или разбавлять) источник горения; порошковые составы изолируют и тормозят реакцию горения; наиболее эффективные газовые составы разбавляют и тормозят реакцию горения и т. д. Однако любое огнетушащее средство обладает одним доминирующим свойством, которое и необходимо учитывать при выборе ОС в конкретных условиях пожара.

Широко распространены в природе естественные ОС (вода, песок и др.). Кроме того, современные технологии позволяют получать такие ОС, которые отсутствуют в природе. Однако не все ОС могут быть взяты на вооружение органами и подразделениями по чрезвычайным ситуациям, а лишь те, которые отвечают определенным требованиям:

- обладают высоким эффектом тушения при сравнительно малом расходе;
- доступны, просты в использовании и имеют низкую стоимость;
- не оказывают вредного воздействия при их применении на людей и материалы, являются экологически чистыми.

7.2. Вода как огнетушащее средство

Вода является одним из наиболее распространенных и наиболее универсальных ОС, применяемых при тушении пожаров. Она эффективна при тушении пожаров, связанных с горением веществ, находящихся во всех агрегатных состояниях. Ее с успехом используют при тушении горящих газов, пожаров ЛВЖ, ГЖ, твердых горючих материалов.

Область применения воды может быть ограничена по следующим причинам:

- водой нельзя тушить горючие вещества и материалы, с которыми она вступает в интенсивное химическое взаимодействие с выделением тепла и горючих компонентов (щелочные, щелочноземельные металлы, карбид кальция и т. д.), а также кислоты и щелочи, с которыми вода бурно взаимодействует;

- нельзя тушить водой пожары с температурой 1800–2000° С, так как при этом происходит сравнительно интенсивная диссоциация паров воды на кислород и водород, которые интенсифицируют процесс горения;

- водой нельзя тушить пожары, при которых ее применение не обеспечивает требуемых условий безопасности для личного состава (например, электроустановки, находящиеся под высоким напряжением).

Во всех остальных случаях вода является надежным, эффективным и поэтому наиболее широко используемым средством тушения пожаров. Это объясняется наиболее удачным сочетанием физико-химических свойств с точки зрения требований к огнетушащим составам: относительно высокой термической устойчивостью, высокими теплоемкостью и теплотой испарения, относительной химической инертностью и т. д.

Вода как ОС имеет свои недостатки. Сравнительно высокая температура замерзания и аномалия изменения плотности при замерзании сильно ограничивают ее использование при отрицательных температурах. Сравнительно малая вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения ухудшают ее смачивающие способности и тем самым снижают коэффициент использования в процессе тушения.

Но низкая стоимость, широкая распространенность, простота использования, удобства хранения и транспортировки, простота и регулируемость подачи в зону горения, безопасность применения, хорошая растворяющая способность и другие положительные свойства в значительной степени компенсируют недостатки воды.

Основные физические свойства воды:

- плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$;
- температура замерзания $T_{\text{зам}} = 0^\circ \text{ С}$;
- температура кипения $T_{\text{кип}} = 100^\circ \text{ С}$;
- плотность насыщенного водяного пара при 100° С и давлении 98,1·10³ Па $\rho_{\text{п}} = 0,6 \text{ кг/м}^3$;
- удельная теплоемкость воды $c_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж/(кг·К)}$;
- удельная теплоемкость паров в диапазоне температур от 100 до 1000° С $c_{\text{пара}} = 2,52 \text{ кДж/(кг·К)}$;
- скрытая теплота парообразования $r = 2260 \text{ кДж/кг}$.

По доминирующему механизму прекращения горения вода относится к категории охлаждающих огнетушащих средств.

Если в факел пламени подать тонкораспыленную воду, то значительная часть или почти вся вода испарится, отняв максимальное количество тепла. Если допустить, что вся масса $m_{\text{в}}$ воды, поданная в зону пламени, полностью испарится, то механизмы отвода тепла и механизм прекращения горения будут следующими:

- снижение температуры пламени из-за затрат тепла на нагревание капелек воды до температуры кипения:

$$Q_1 = c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \Delta T = c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_0);$$

- снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на парообразование (на испарение):

$$Q_2 = r \cdot m_{\text{в}};$$

- снижение температуры факела пламени до температуры потухания за счет смешения паров воды при температуре 100 °С и реагентов в зоне реакции и за счет затрат тепла на нагревание паров воды до температуры среды в зоне горения:

$$Q_3 = c_{\text{пара}} \cdot m_{\text{в}} \cdot \Delta T = c_{\text{пара}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (T_{\text{пот}} - 100);$$

- разбавление компонентов горючей смеси в зоне химической реакции горения парами воды;

- изменение теплофизических свойств газовой среды ($c_{\text{п}}^{\text{см}}$; $\lambda_{\text{см}}$ и др.) в зоне горения.

Количество тепла, отводимое при объемном тушении 1 л (1 кг) воды, имеющей начальную температуру $T_0 = 20^\circ \text{C}$, теоретически будет равно:

$$Q_{\text{охл}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 4,19 \cdot 1 \cdot (100 - 20) + 2260 \cdot 1 + 2,52 \cdot 1 \cdot (1000 - 100) \approx 4860 \text{ кДж/кг},$$

т. е. 1 л воды, введенной в зону горения, при полном ее испарении и нагревании паров до наименьшей температуры пламени способен отнять от факела пламени 4860 кДж тепла.

При тушении по поверхности водой, имеющей $T_0 = 20^\circ \text{C}$,

$$Q_{\text{охл}} = 4,19(100 - 20) + 2260 \approx 2600 \text{ кДж/л}.$$

Разбавляющий эффект воды заключается в том, что при полном ее испарении из 1 л образуется 1720 л пара, который является огнетушащим веществом.

7.3. Нейтральные газы в пожаротушении

К нейтральным газам (НГ) относятся вещества, которые химически не взаимодействуют с горючим или окислителем, но при нахождении в зоне горения оказывают влияние на протекающие в ней физико-химические процессы.

К данной категории веществ относят углекислый газ, азот, водяной пар (технологический или отработанный), тонкораспыленную воду, аргон, гелий, дымовые или отработанные газы, газоводяные смеси и т. д.

Механизм прекращения горения нейтральными газами является наиболее простым, если сравнивать их с другими известными огнетушащими составами (например, с пеной, порошковыми средствами, химическими активными ингибиторами и т. п.). НГ относятся к огнетушащим средствам разбавления. Попадая в зону протекания реакций горения, эти газы разбавляют горючую газовую смесь, состоящую из молекул горючего и окислителя, снижая тем самым их концентрации в единице объема. Последнее в итоге приводит к уменьшению скорости протекающих реакций и, соответственно, скорости тепловыделения, а значит, и к снижению температуры, вплоть до температуры потухания.

Введение НГ в зону реакции в результате разбавления горючей смеси снижает интенсивность тепловыделения $q_1 = f(T)$ за счет уменьшения скорости реакции:

$$\omega = Q\Delta V k_o C_1^{v_1} C_2^{v_2} e^{-E/RT},$$

где Q — тепловой эффект реакции горения горючего газа; ΔV — элементарный объем в зоне реакции; k_o — константа скорости химической реакции; v_1 и v_2 — порядок реакции соответственно по горючему и окислителю; C_1 и C_2 — концентрации горючего и окислителя соответственно; E — энергия активации реакций горения; R — универсальная газовая постоянная; T — температура реагирующей смеси.

Другая составляющая механизма тушения нейтральными газами заключается в разбавлении воздуха и снижении в нем содержания кислорода до предельной концентрации, при которой горение невозможно. Для большинства веществ диффузионное горение прекращается при снижении концентрации кислорода до 12–15%. Для веществ, характеризующихся широкой областью воспламене-

ния (водород, ацетилен и т. д.), металлов (например, щелочных), гидридов некоторых металлов, металлоорганических соединений, тлеющих материалов данное значение уменьшается до 5% и менее.

Установлено, что введение нейтральных газов в горючую смесь сужает область воспламенения. Это в основном достигается за счет уменьшения верхнего концентрационного предела воспламенения. При некоторой концентрации разбавителя (флегматизатора) смесь становится пожаробезопасной. Данная концентрация называется минимальной флегматизирующей или минимальной огнетушащей.

Кроме того, нейтральный газ уменьшает температуру окружающей среды, что приводит к повышению интенсивности теплоотвода от зоны горения $q_2 = f(T)$ за счет роста интенсивности конвективного и лучистого тепловых потоков от пламени.

Огнетушащие концентрации нейтральных газов зависят не только от горючего, но и от вида разбавителя. Например, для CO_2 $\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = 20\text{--}25\%$ об.; гелия и азота — $\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = 35\text{--}40\%$ об.; аргона — $\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = 50\text{--}55\%$ об.; воды — $\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = 30\text{--}35\%$ об. Это объясняется тем фактом, что огнетушащая концентрация нейтрального газа пропорциональна отношению c_p/λ , где c_p — удельная теплоемкость нейтрального газа; λ — коэффициент теплопроводности НГ. Действительно, чем выше теплоемкость вводимого в зону горения нейтрального газа, тем интенсивнее теплоотвод из зоны химической реакции, а значит, эффективнее его огнетушащее действие.

Указанные рассуждения показывают, что НГ действуют как по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, так и по механизму прекращения горения теплоотводом на нагревание вводимых нейтральных газов, а также по механизму интенсификации теплоотвода из зоны реакции.

Нейтральные газы применяются в основном для объемного тушения пожаров классов A_2 (горение твердых веществ без тления), B (горение жидких веществ), C (горение газов).

Диоксид углерода (углекислый газ, CO_2) находит наиболее широкое применение из указанных нейтральных газов. При повышенных концентрациях в воздухе CO_2 вызывает раздражение слизистой оболочки глаз и дыхательных путей. Возможно также поражение кожи, которое проявляется в виде ожога. Внезапное воздействие

CO₂ в количестве 6–10% об. может вызвать смертельный исход. В силу сказанного при применении углекислого газа в системах объемного тушения должно быть предусмотрено сигнализирующее устройство, предупреждающее об опасности. Промежуток времени между сигналом и пуском установки должен быть достаточным для эвакуации людей из помещения.

Диоксид углерода применяется для тушения, когда использование воды или других средств может вызвать взрыв, интенсифицировать процесс горения или вызвать повреждение оборудования и материалов (телефонные станции, музеи, выставки, архивы, картинные галереи, книгохранилища, приборы под напряжением, аккумуляторные станции, сушильные печи, стенды для испытания двигателей, исследовательские лаборатории и т. д.). Кроме тушения пожаров в помещениях, пустотах конструкций CO₂ применяют для защиты свободных объемов с целью предупреждения взрывов в качестве нагнетающего газа для перекачки ЛВЖ.

Не рекомендуется применять CO₂ для тушения пожаров в высокочувствительных установках, например в установках слабого тока, телеизвещателях, радиостанциях, электронных установках. Не используют его для тушения щелочных и щелочноземельных металлов, алюминия, некоторых гидридов и карбидов металлов, металлоорганических соединений, водорода, раскаленного угля и т. д. В случае, когда углекислый газ применять нельзя, используют азот или аргон.

Для ряда горючих газов (ацетон, бензол, метан, пропан, водород и др.) минимальные количества CO₂, определенные теоретически и полученные практически, представлены в справочной литературе. Для других газов теоретическую флегматизирующую концентрацию CO₂ ($\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}}$) рассчитывают по предельному содержанию кислорода, которое необходимо для горения:

$$\varphi_{\text{огн}}^{\text{min}} = (21 - [\text{O}_2]) / 21 \cdot 100,$$

где [O₂] – предельное содержание кислорода.

Применение *азота* для объемного тушения экономически менее выгодно, чем двуокиси углерода. Азот используется в стационарных установках для тушения Na, K, Be, Ca и других металлов, которые горят в атмосфере CO₂. Как и углекислый газ, азот плохо

тушит волокнистые (хлопок, ткани и т. п.), тлеющие (дерево, бумага и т. д.) и некоторые другие материалы. Он нашел применение в технологических установках для заполнения свободных объемов и сосудов над ЛВЖ с целью предохранения производственных установок и аппаратуры от взрыва.

В химическом отношении *аргон* является инертным газом, не образующим соединений ни с какими другими элементами. Его используют в металлургических и химических процессах, требующих инертной среды, в светотехнике, электронике, ядерной энергетике, для тушения пожаров некоторых металлов, когда использование азота может сопровождаться образованием нитридов, обладающих взрывоопасными свойствами.

Водяной пар как огнетушащее средство используют в основном на предприятиях, имеющих мощное паросиловое хозяйство, — нефтеперерабатывающих заводах, тепловых станциях, деревообрабатывающих предприятиях и т. п. В силу невысокой эффективности тушения он может применяться для защиты закрытых технологических аппаратов и помещений до 500 м³ (трюмы судов, трубчатые печи нефтехимических предприятий, насосные станции по перекачке нефтепродуктов, сушильные и покрасочные камеры), для тушения небольших пожаров на открытых площадях и создания завес вокруг защищаемых объектов.

Тонкораспыленная вода в виде капель размером менее 100 мкм может быть получена с помощью специального оборудования (стволов-распылителей, например). Образующиеся при этом водяные струи обладают небольшой ударной силой и дальностью полета, но способны орошать значительную площадь поверхности. В таком состоянии вода интенсивно испаряется и характеризуется повышенным охлаждающим эффектом, хорошо разбавляет горючую среду, быстро снижает температуру, осаждает дым. При этом материалы при их тушении увлажняются незначительно.

7.4. Химически активные ингибиторы

Галогенпроизводные предельных углеводородов находят широкое применение как средство тушения и предупреждения пожаров и взрывов. Они оказывают активное воздействие на зону реакции

горения, влияют на кинетику и механизм протекающих в пламени реакций и поэтому получили название химически активных ингибиторов (ХАИ). В качестве ХАИ чаще всего используются как наиболее эффективные и удобные производные метана и этана (бромэтил, бромистый метилен и др.), в молекулах которых атомы водорода частично или полностью замещены атомами галогенов.

Учитывая дефицитность и достаточно высокую стоимость йодпроизводных, основными практическими ингибиторами выбрали бром-, фтор- и хлорсодержащие углеводороды. Это, например, тетрафтордибромэтан $C_2F_4Br_2$, трифторбромметан CF_3Br , дифтордибромметан CF_2Br_2 , дифторхлорбромметан CF_2ClBr . Среди веществ, используемых для производства огнетушащих составов за рубежом, следует назвать трифторхлордибромэтан CF_3-CBr_2Cl , тетрахлорметан CCl_4 , хлорбромметан CH_2ClBr , фторхлордибромметан $CFClBr_2$, трибромметан CBr_3 и т. д.

Галогенпроизводные предельных углеводородов, используемые в качестве ХАИ, имеют торговые наименования. В странах СНГ ранее они назывались фреонами, в настоящее время их принято называть хладонами. За рубежом получило распространение название «галлоны».

Галогенпроизводные предельных углеводородов имеют низкие температуры замерзания, обладают хорошими диэлектрическими характеристиками.

Галогенпроизводные, используемые в качестве огнетушащих средств, относятся к трудногорючим веществам. Однако в атмосфере кислорода некоторые из них становятся горючими.

Механизм ингибирования пламени хладонами до конца не изучен. Это объясняется чрезвычайной сложностью процессов горения и ингибирования. Тем не менее предполагается, что ингибирование горения галогенпроизводными протекает по радикальному механизму.

Известно, что процессы горения и взрывов относятся к классу цепных реакций, т. е. являются многостадийными. Продолжение каждой последующей стадии возможно только при успешном протекании предыдущей. На промежуточных стадиях в реакциях участвуют активные центры — радикалы (валентно ненасыщенные

частицы), вследствие чего они легко взаимодействуют с исходными молекулами или между собой. Роль активных центров могут играть, например, атомы Н, Cl, ·О· и группы атомов ·ОН, ·СН₃ и т. д. И если в зону протекания химической реакции окисления ввести компоненты (добавки), которые связывают последние, то становится возможным обрыв цепей и, как следствие, торможение скорости реакции, вплоть до потухания.

Количество ХАИ, которое надо ввести в зону реакции для прекращения горения, очень мало (приведено в справочной литературе). Для наиболее эффективных хладонов оно составляет 2–4%, что в десятки раз меньше огнетушащих концентраций используемых на практике нейтральных газов (у углекислого газа, например, 25–30%, аргона – 50–55%, азота – 35–40%, водяного пара – 30–35% и т. д.).

Составы на основе хладонов эффективно подавляют горение различных веществ во всех трех агрегатных состояниях при любых видах пожара. Наиболее целесообразно их применение для объемного тушения в зданиях, помещениях, сооружениях и т. д. Хладоны успешно используются для защиты музеев, архивов, вычислительных центров, окрасочных камер, отделений, складов с горючими материалами и т. д. С помощью стационарных установок для тушения внутренних пожаров в объеме помещения, где происходит пожар, в течение короткого промежутка времени (1–2 мин) может быть создана концентрация ХАИ, равная или превышающая огнетушащую (хотя время тушения хладоном должно составлять около 10 с). При этом следует учитывать утечки с продуктами горения хладона, находящегося в газообразном состоянии, через неплотности, неравномерность по защищенному объему и т. д.

Количество хладона в установках пожаротушения определяется по следующей формуле (кг):

$$M = V g_n \cdot \kappa + m_1 \cdot \xi + m_2 + m_3,$$

где V – защищаемый объем помещения, м³; g_n – нормативная огнетушащая концентрация, принимаемая для зданий и помещений категорий А и Б равной 0,37 кг/м³, для категории В – 0,22 кг/м³; κ – коэффициент, учитывающий потери хладона в трубопроводах и в результате утечки из помещений (1,2 – для помещений, 1,1 – для

подвалов); m_1 — остаток хладона в баллоне, кг; ξ — число баллонов; m_2 — остаток хладона в распределительных трубопроводах, кг.

При наличии постоянных проемов, площадь поверхности которых составляет до 10% от площади поверхности ограждающих конструкций, должен быть предусмотрен дополнительный расход хладона m_3 , равный 2 кг на 1 м² площади проема. Огнетушащие составы на основе галогенпроизводных углеводородов рекомендуется использовать для защиты помещений объемом до 3000 м³. Но эта норма может быть увеличена.

Из-за небольшого поверхностного натяжения и гораздо лучшей смачивающей способности по сравнению с водой и углекислым газом составы на основе ХАИ могут успешно использоваться для тушения пожаров волокнистых материалов. Вследствие хороших диэлектрических свойств их можно применять для тушения оборудования под напряжением.

Для подавления глубинных пожаров ХАИ малоэффективны. Не рекомендуется применять рассматриваемые составы для тушения металлов, некоторых металлоорганических соединений и гидридов металлов, а также для подавления процессов горения, в которых в качестве окислителя участвует не кислород, а другие химические вещества (окислы азота, например).

Вследствие быстрого испарения хладонов в условиях пожара не должно быть опасений в отношении их агрессивности к полимерам и материалам на их основе.

7.5. Основные параметры и виды пен, область их применения

Пены относятся к огнетушащим средствам, широко используемым при пожаротушении. Это связано с преимуществами, которыми они обладают по сравнению с таким традиционным ОС, как вода. Применение пен позволяет сократить время тушения пожаров в 3 раза, уменьшить материальные потери от пожаров в 1,5 раза. Пенами тушат пожары классов А и В.

Пена представляет собой грубодисперсную двухфазную систему, состоящую из ячеек, заполненных газом и разделенных пленками жидкости. Газ (или пар), заполняющий ячейки, является дис-

персной фазой, а жидкость — дисперсионной средой. Жидкую фазу пены называют отсеком.

Кратностью пены $K_{\text{пены}}$ называется отношение объема пены $V_{\text{п}}$ к объему жидкой фазы, из которой она получена:

$$K_{\text{пены}} = V_{\text{п}}/V_{\text{ж}} = (V_{\text{г}} + V_{\text{ж}})/V_{\text{ж}}.$$

Отношение объема газа в пене к объему пены называется **газосодержанием пены** β :

$$\beta = V_{\text{г}}/V_{\text{ж}}.$$

Газосодержание и кратность связаны между собой соотношением

$$\beta = (K_{\text{пены}} - 1)/K_{\text{пены}} = 1 - 1/K_{\text{п}}.$$

Дисперсность пены $D_{\text{п}}$ оценивается либо средним размером пузырьков пены $d_{\text{ср}}$, либо их распределением по размерам:

$$D_{\text{п}} = 1/d_{\text{ср}};$$

$$d_{\text{ср}} = (\sum d_i \cdot N_i) / \sum N_i,$$

где d_i — диаметр пузырьков фракции; $\sum N_i$ — общее число пузырьков всех фракций; N_i — число пузырьков фракции i с диаметром d_i .

Видно, что с уменьшением диаметра пузырьков пены ее дисперсность возрастает. Если пузырьки имеют одинаковые размеры, пена называется монодисперсной, если имеется много размеров (фракций) пузырьков, пена называется полидисперсной.

На дисперсность пены оказывают влияние физико-химические свойства пенообразователя, способ смешения фаз, конструкция пеногенератора и т. д. Чем выше дисперсность пены, тем она более подвижна. С повышением кратности пены ее дисперсность уменьшается.

Вязкость пены характеризует ее способность к растеканию и оценивается коэффициентом динамической вязкости μ либо напряжением сдвига σ . Коэффициент динамической вязкости возрастает с увеличением кратности пены и ее дисперсности.

Плотность пены зависит от соотношения жидкой и газовой фаз и может изменяться от $0,5\rho_{\text{ж}}$ до значений, близких к $\rho_{\text{г}}$ ($\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{г}}$ — плотности жидкой и газовой фаз соответственно). Пены, используемые для тушения пожаров, обычно имеют плотность 10—5 кг/м³ и меньше.

Электропроводность пены пропорциональна количеству содержащейся в ней жидкости. Уравнение, описывающее эту зависимость, имеет следующий вид:

$$X_{\text{ж}}/X_{\text{п}} = 3/2K_{\text{пены}},$$

где $X_{\text{ж}}$, $X_{\text{п}}$ — удельные электропроводности раствора и пены соответственно.

Пена, как любая дисперсная система, является неустойчивой. Это связано с избытком поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела фаз жидкость — газ. Поэтому с момента образования пены в ней протекают процессы старения, в результате которых пена изменяет свои свойства. Наиболее интенсивные изменения наблюдаются в начальный момент.

Разрушение пены в нормальных условиях происходит в результате истечения жидкости (синерезиса) и разрыва пленок внутри пены. Следствием этого является изменение структуры. В процессе старения сферическая форма ячеек преобразуется в многогранную. Кроме того, с момента образования в пене начинается процесс диффузионного переноса воздуха из маленьких пузырьков в большие. Это приводит к уменьшению общего числа пузырьков и увеличению их среднего диаметра.

В реальных условиях при тушении пожара пена разрушается также в результате деформации пузырьков под действием силы трения при движении, термического воздействия окружающей среды, конвективных потоков и др. Эти процессы могут быть охарактеризованы интенсивностью разрушения, которая определяется по формуле

$$I_{\text{разр}} = \Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}} / (V_{\text{п}} \cdot \Delta \tau),$$

где $\Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}}$ — объем пены, разрушенной за промежуток времени $\Delta \tau$; $V_{\text{п}}$ — начальный объем пены.

В настоящее время чаще пользуются понятием «устойчивость пены». **Устойчивость пены** — это ее способность сохранять объем, дисперсный состав и препятствовать синерезису. Устойчивость — величина, обратная интенсивности разрушения:

$$S_{\text{п}} = 1/I_{\text{разр}}.$$

Устойчивость пены зависит от многих факторов, но следует выделить следующие: температура окружающей среды, дисперсность пены (моно- или полидисперсная), ее кратность, высота слоя, давление упругих паров ГЖ, механическое воздействие на нее при движении. Для повышения устойчивости пен в них вводят вещества-стабилизаторы (соли поливалентных металлов, глинозем, поливиниловый спирт, эфиры целлюлозы, полиакриламид, протеин и т. д.).

Поскольку чистые жидкости имеют большое поверхностное натяжение, для получения пены в систему необходимо вводить добавки, понижающие поверхностное натяжение воды. В качестве этих добавок, называемых пенообразователями, могут применяться некоторые природные (сапонин, экстракт солодкового корня и др.) и синтетические (алкилсульфаты, алкилсульфонаты и др.) поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Пенообразователи (ПО) представляют собой концентрированные водные растворы ПАВ, содержание которых обычно составляет 25–30% в пересчете на активное вещество. Рабочие растворы, из которых непосредственно готовят пену, содержат 0,1–0,2% ПАВ. ПАВ понижают поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – газ.

ПО подразделяются на две группы – общего и целевого назначения. ПО целевого назначения используются для получения пены при отрицательных температурах, из воды, содержащей достаточно большое количество минеральных солей и т. д.

Следует выделить *основные механизмы прекращения горения с применением пены*:

- изоляция паров горючей жидкости от зоны горения; изолирующее действие пены зависит от ее физико-химических свойств, структуры, толщины слоя, а также от природы горючего материала и температуры на его поверхности;
- охлаждение прогретого слоя отсеком жидкости пены; особенно существенное значение этот механизм имеет при тушении пенной твердых горючих материалов;
- экранирование горячей жидкости от лучистого теплового потока; вследствие низкой теплопроводности пены поступление тепла к поверхности горючего материала затруднено;

- разбавление горючей смеси в зоне горения парами пенообразующего раствора;
- охлаждение зоны горения парами воды.

По способу получения пены бывают химическими и воздушно-механическими.

Химические пены, образующиеся при взаимодействии растворов кислот и щелочей в присутствии пенообразующего раствора, из-за сравнительно высокой стоимости и сложности организации тушения ими пожаров используются крайне редко.

В настоящее время повсеместно используются *воздушно-механические пены* (ВМП), для получения которых используют специальную технику.

ВМП может быть:

- низкой кратности ($3 < K_n \leq 20$);
- средней кратности ($20 < K_n \leq 200$);
- высокой кратности ($K_n > 200$).

ВМП *низкой кратности* получается из стволов СВП, в которых используется принцип эжекции (подсоса) воздуха и перемешивания его с водным раствором. Дальность струи такой пены не менее 28 м. Она имеет ограниченное применение. ВМП низкой кратности используется для тушения разлитых нефтепродуктов, складов древесины и волокнистых материалов, так как она хорошо проникает в неплотности и удерживается на поверхности. Следует помнить, что вследствие высокой плотности существует вероятность погружения пены низкой кратности внутрь горючей жидкости.

Широко применяется ВМП *средней кратности*. Для ее получения используют простую пеногенерирующую аппаратуру типа ГПС-200, ГПС-600, ГПС-2000, обеспечивающую одновременную подачу на металлическую сетку 2–6% водного раствора ПО и эжектируемого потоком этого раствора воздуха. Дальность подачи струи такой пены 10–13 м. Пенной средней кратности тушат по площади и по объему. Она является основным средством тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах и на разлитых поверхностях. Она также используется для вытеснения дыма при объемном тушении, изоляции расположенных рядом с очагами пожара объектов от воздействия тепловых и газовых потоков. Но после применения

пены в подвалах и тоннелях, шахтах и т. д. отдельные очаги горения необходимо ликвидировать водяными струями.

ВМП *высокой кратности* получается из пеногенерирующих установок в результате принудительного наддува воздуха в пеногенератор от вентилятора. На практике ее получают с использованием дымососов ДПЭ-7, ДПМ-7. Такая пена применяется при объемном тушении для локализации пожара, снижения температуры, вытеснения дыма. Высокократная пена эффективно применяется для осаждения радиоактивных загрязнений из воздуха, тушения пожаров органических растворителей, тушения пожаров на кораблях, в библиотеках, архивах, шахтах и т. д.

У ВМП высокой кратности имеются также недостатки:

- подача ее на значительное расстояние затруднена;
- она легко сдувается ветром и восходящими потоками продуктов горения;
- быстро разрушается при контакте с сухими предметами и очень чувствительна к воздействию высоких температур;
- при ее использовании в закрытых помещениях должно быть предусмотрено отверстие для удаления воздуха и т. д.

Следует помнить, что из-за хорошей электропроводности пенного раствора запрещено применять пены для тушения пожаров в электроустановках под напряжением. Последнее обстоятельство в особенности необходимо учитывать при использовании ВМП низкой и средней кратности. Кроме того, при контакте с горящими щелочными и щелочноземельными металлами наблюдается химическое взаимодействие их с содержащейся в пене водой, поэтому использовать пену для их тушения не допускается.

7.6. Огнетушащие порошки

В последние годы в практике тушения пожаров все более широкое применение находят порошковые огнетушащие составы (ПОС). Это связано с тем, что порошковые составы могут применяться для тушения практически всех видов пожаров в различных отраслях промышленности и на транспорте.

ПОС чаще всего представляют собой тонкодисперсные порошки негорючих твердых веществ, основной составной частью кото-

рых являются аммонийные соли и соли металлов. Для повышения огнетушащей способности и улучшения эксплуатационных свойств в их состав вводят стеараты металлов, стеариновую кислоту, тальк, флюсы, аэросил, нефелиновый концентрат, триалкилфосфаты, силиконовые смолы, асбест, графит и т. д.

По своему назначению ПОС условно делятся на составы общего назначения и составы специального назначения (табл. 4 и 5).

Порошковые составы общего назначения рекомендуется использовать для тушения пожаров классов А, В, С, Е.

Порошковые составы специального назначения рекомендуются для тушения пожаров класса D и других, связанных с горением легких и щелочных металлов и их сплавов.

Номенклатура, применяемая за рубежом, отличается от приведенной выше. Порошковые составы имеют либо торговые названия (Monnex, Favorit, Total, Zosson и т. д.), либо условно называются по классам пожаров, для тушения которых они рекомендуются (ВСЕ, ABCDE — для тушения пожаров классов В, С, Е и А, В, С, D, Е соответственно).

Таблица 4

Порошковые огнетушащие составы общего назначения

Марка порошка	Область применения	Примерный состав	Насыпная плотность, кг/м ³	Нормы расхода, кг/м ²
ПСБ (ПСБ-1, ПСБ-2 и т. д.)	Для тушения газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, растворов, электроустановок	Гидрокарбонат натрия; карбонат кальция; тальк; аэросил (кремнийорганическая добавка)	900—1200	2,5
ПФ (ПФ-1, ПФ-2 и др.)	Для тушения ЛВЖ, масел, растворителей, тлеющих материалов	Гидрофосфат аммония; стеараты железа, магния; поливинилхлоридная смола	800—900	2,5
П (П-1, П-2 и др.)	Для тушения газов, ЛВЖ, растворителей, нефтепродуктов, тлеющих материалов, электроустановок	Фосфорноаммонийные соли; добавки (аэросил)	800—1000	2,5

Таблица 5

Порошковые огнетушащие составы специального назначения

Марка порошка	Область применения	Примерный состав	Насыпная плотность, кг/м ³	Нормы расхода, кг/м ²
ПС (ПС-1, ПС-2 и др.)	Для тушения щелочных металлов, сплавов, магния	Карбонат натрия; графит; стеараты магния, цинка, кальция	5–1100	20–40
СИ (СИ-1, СИ-2 и др.)	Для тушения пирогенных соединений (гидридов металлов, элементоорганических соединений и т. д.)	Силикагель; хладон 114В2	900	20–30

ПОС по основному назначению делятся на классы: АВС, ВС, ABCD и D. Порошковые составы классов АВС и ABCD являются огнетушащими веществами объемно-поверхностного действия, ВС – преимущественно объемного, D – поверхностного действия (порошки целевого назначения, предназначены для тушения металлов, металлоорганических соединений).

Достоинствами ПОС являются их универсальность, высокая огнетушащая эффективность, возможность применения при отрицательных температурах, отсутствие токсичности, относительная долговечность, способность тушения электрооборудования, находящегося под напряжением до 1000 В.

Основной недостаток ПОС заключается в их гидрофильности, склонности к увлажнению, слеживанию и комкованию. Поэтому их влажность не должна превышать 0,5%. Для их подачи в зону горения должен использоваться пневмотранспорт, что ограничивает максимальную дальность полета струй воздушно-порошковой смеси (10–15 м для ручных, 20–25 м – для лафетных стволов). Кроме того, при применении ПОС в силу их высокой дисперсности образуется значительное количество пыли, что обуславливает необходимость работы в специальной одежде и средствах защиты органов дыхания. ПОС не обладают ярко выраженным охлаждающим действием, поэтому при наличии в зоне пожара раскаленных

металлических поверхностей прибегают к комбинированному тушению порошковыми и пенными средствами с целью исключения возможности повторного воспламенения.

Огнетушащая эффективность и эксплуатационные свойства ПОС определяются химическим составом их компонентов.

Наиболее широкое применение получили порошковые составы на основе бикарбоната натрия и фосфатов аммония. В отдельных случаях для специальных целей используются глинозем, фтористый кальций, силикагель, хлориды щелочных металлов и другие порошковые материалы.

Порошки на основе гидрокарбоната натрия более других устойчивы против слеживания. Иодиды и бромиды щелочных металлов, фосфат аммония обладают хорошими огнетушащими свойствами, но гигроскопичны и для них в сильной степени характерен указанный выше недостаток. Для фторидов металлов, сульфата аммония, наоборот, характерны хорошие эксплуатационные свойства, но они неспособны эффективно гасить пламя.

Наиболее эффективными ингибиторами горения являются оксалат калия и хлориды щелочных металлов. Особенно высокой эффективностью обладает оксалат, что обусловлено его способностью к растрескиванию и увеличению тем самым суммарной площади поверхности в единице объема. Кроме того, при сильном нагревании происходит частичное его испарение, что сопровождается гомогенным ингибированием процессов, имеющих место в пламени.

Наиболее перспективными для создания новых эффективных ПОС представляются хлориды вследствие их низкой токсичности и широкой распространенности.

В целом можно отметить, что эффективность солей повышается с увеличением атомного веса их катиона. Анион соли здесь также вносит свой вклад. Чем легче протекает процесс разложения соли, тем, как правило, выше ее огнетушащая эффективность. Поэтому наибольшее распространение получили соли угольной, щавелевой, фосфорной и винной кислот.

Механизм огнетушащего действия ПОС до конца не изучен. Их относят к изолирующим огнетушащим средствам. Но это не в полной мере отражает процессы, происходящие в пламени при

использовании порошковых составов. Можно указать следующие составляющие сложного механизма тушения:

1) простое физическое разбавление реагентов в зоне химических реакций (на это указывает повышение эффективности тушения ПОС общего назначения при увеличении их дисперсности);

2) охлаждение зоны реакций вследствие поглощения тепла частицами малой массы с большой суммарной теплоемкостью и тепловоспринимающей поверхностью;

3) эффект «холодной стенки», достигаемый при прохождении пламени через узкие каналы, как бы создаваемые порошковым облаком;

4) гетерогенное ингибирование, если поверхность твердых частиц химически активна по отношению к радикалам зоны химических реакций в пламени;

5) охлаждение зоны реакций вследствие протекания эндотермического процесса разложения солей;

6) разбавление реагирующих компонентов выделяющимися при разложении солей газами и парами;

7) гомогенное ингибирование, если испарившиеся при введении в зону горения порошков продукты являются химически активными ингибиторами (СИ-2);

8) экранирующее действие неразложившихся в зоне реакций и покрывающих горючие материалы твердых частиц;

9) изолирующее действие оседающих частиц, препятствующее доступу воздуха в зону пиролиза горючих материалов и выходу горючих компонентов в зону горения;

10) образование на поверхности горящего материала полимерной пленки полифосфатов и, соответственно, ее экранирующее и изолирующее действие (в случае использования ПОС на основе фосфатов аммония).

Доминирующий механизм огнетушащего действия ПОС определяет наиболее рациональный способ их подачи в зону горения.

При тушении пламени газовых фонтанов целесообразно реализовать объемные механизмы тушения: разбавление, химическое ингибирование и т. д. Это определяет и способ, и зону наиболее интенсивной подачи ПОС: рассредоточенно, объемно, снизу вверх, преимущественно в факел пламени.

При тушении щелочных металлов должны реализоваться изолирующее и охлаждающее поверхность горючего материала действие порошковой массы. Поэтому ПОС подаются компактно, сосредоточенно, сверху вниз или сбоку, чтобы создать на поверхности материала более толстый слой порошковой массы.

Наконец, при разливе ЛВЖ или ГЖ или при пожарах в резервуарах с указанными жидкостями ПОС должны подаваться в зависимости от их химической природы и доминирующего механизма их огнетушащего действия.

Тушение пожаров порошковыми средствами может осуществляться из различного пожарного оборудования: переносных и передвижных огнетушителей, автомобилей порошкового тушения, стационарных установок.

7.7. Аэрозолеобразующие составы

Аэрозолеобразующие огнетушащие составы (АОС) представляют собой специальные твердотопливные или пиротехнические композиции, способные к самостоятельному горению без доступа воздуха с образованием инертных газов, высокодисперсных солей и окислов щелочных металлов.

Химический состав аэрозолей и огнетушащих порошков практически аналогичен. Но дисперсность частиц аэрозоля на несколько порядков выше. Этим в значительной степени и обусловлена более высокая огнетушащая эффективность АОС по сравнению с порошковыми составами. Кроме того, применение АОС сопровождается некоторым снижением концентрации кислорода в защищаемом помещении. Происходит расходование кислорода на догорание газоаэрозольной смеси, выходящей из генератора, и разбавление атмосферы газообразными продуктами, образующимися при работе генератора огнезащитного аэрозоля (ГОА).

Аэрозольная технология считается совершенно новой прежде всего по следующим соображениям:

- невозможно обеспечить длительное хранение и надежную доставку в зону пожара порошка столь высокой дисперсности;
- огнетушащее вещество генерируется непосредственно в процессе тушения пожара.

Принцип работы ГОА весьма прост. При пожаре срабатывает (от пожарного извещателя, огнепроводного шнура, ручного замыкания электрической цепи воспламенителя кнопкой) инициирующая система и воспламеняет состав, продукты сгорания которого представляют собой аэрозоль, содержащий до 70–80% активированной ингибирующей добавки. При горении аэрозолеобразующих составов инициируется интенсивная химическая окислительно-восстановительная реакция, при которой образуется и выбрасывается в защищаемый объем смесь газов (азот, углекислый газ, водяной пар и другие) и поток твердых частиц окислов и солей металлов. Твердые частицы так малы (0,5–4,0 мкм), что способны находиться в воздухе во взвешенном состоянии длительное время (при определенных условиях – до 1 часа).

В зависимости от технологии изготовления заряда АОС различаются видом горючего-связующего. Этим обуславливаются существенные различия в химическом и дисперсном составе твердой фазы аэрозоля. Аэрозолеобразующие составы используются в виде цилиндрических брикетов (шашек), представляющих собой огне-тушащий заряд требуемой массы.

Конструкция генератора аэрозоля, т. е. устройство, куда помещается заряд, должна обеспечивать его защиту от повреждений при транспортировке и хранении, своевременное и правильное инициирование реакции аэрозолеобразования, а также подачу аэрозоля в защищаемый объем.

Для воспламенения заряда обычно используются механические, термомеханические, термохимические и электрические узлы запуска. Многие ГОА имеют устройства для запуска от нескольких разнотипных сигналов. Наиболее часто встречаются генераторы, имеющие устройства для пуска от электрического и (или) теплового сигналов. В качестве первичных средств пожаротушения используются генераторы с ручным пуском.

Тепловой пуск ГОА обычно осуществляется от огнепроводного шнура (термошнура), изготовленного с заданными формой и размерами. Огнепроводный шнур размещают в местах наиболее вероятного возникновения загорания в защищаемом помещении. При возникновении пожара он самовоспламеняется. Огневой им-

пульс распространяется по шнуру и приводит в действие генератор. Возможно также воспламенение огнепроводного шнура от специальных пиромеханических устройств, срабатывающих при достижении в контролируемой зоне защищаемого помещения заданной, как правило, более низкой температуры, чем температура самовоспламенения огнепроводного шнура. При таком способе пуск ГОА не требует постоянного источника энергии. Функционирование таких установок осуществляется в автономном режиме. Генераторы, имеющие пуск только от термощнура, не могут быть отнесены к автоматическим установкам пожаротушения.

ГОА эффективны при тушении горючих жидкостей, газов, электрооборудования под напряжением, кабелей, транспортных средств (автомобилей, локомотивов, кораблей и т. п.), гаражей и т. д.

К преимуществам АОС можно отнести следующие их свойства:

- более высокая эффективность по сравнению с хладонами;
- инертность ингибирующего аэрозоля по отношению к озоновому слою атмосферы;
- сравнительно низкая токсичность;
- отсутствие коррозионной активности по отношению к металлам всех типов;
- диэлектрические свойства;
- практически отсутствие воздействия на книги, предметы искусства, пищевые продукты и т. д.

Твердые частицы не оказывают вредного действия на одежду и кожные покровы человека, не вызывают порчу имущества, легко удаляются из помещения (например, с помощью воды или пылесоса).

Аэрозоль раздражает слизистые оболочки органов дыхания и глаз, но этого можно избежать с помощью простейших защитных приспособлений.

ГОА устанавливаются:

- в производственных, административных и жилых зданиях;
- в складских помещениях, хранилищах, гаражах, цехах, офисах, лабораториях научных и учебных заведений, на объектах энергетики;
- на железнодорожном и автотранспорте, на морских и речных судах.

Система аэрозольного пожаротушения позволяет отказаться от применения дорогих и дефицитных насосов, труб, арматуры, баллонов. Это практически исключает эксплуатационные затраты. К тому же она не требует перезарядки.

Сравнительный анализ показывает, что автоматическая система аэрозольного пожаротушения дешевле порошковой и пенной систем в 5 раз, а газового тушения – в 50 раз.

Свойство аэрозоля находиться во взвешенном состоянии способствует быстрому его уносу из помещения, если оно недостаточно герметично. С увеличением степени негерметичности защищаемого помещения значительно возрастает масса аэрозолеобразующего состава, необходимая для тушения пожара. Поэтому в помещениях, для которых отношение площади всех постоянно открытых проемов к общей площади ограждающих конструкций превышает 1,5%, применять систему аэрозольного пожаротушения, как правило, нецелесообразно.

Установлено, что средства аэрозольного пожаротушения неэффективны при тушении материалов, горение которых происходит в тлеющем режиме. При времени свободного горения очага пожара из древесины, превышающем 35 мин, на поверхности горящего материала успевает образоваться обуглившийся слой, т. е. горение распространяется вглубь материала. Такой очаг вообще практически невозможно потушить средствами аэрозольного пожаротушения и любыми порошковыми составами. После подачи огнетушащего аэрозоля прекращается лишь пламенное горение, однако остающийся очаг тления в результате снижения концентрации аэрозоля в защищаемом объеме приводит к разгоранию древесины и возобновлению пламенного горения. Поэтому в реальных условиях речь может идти лишь о локализации пожара в результате применения средств аэрозольного пожаротушения. Тушение таких пожаров может достигаться только в том случае, если будет обеспечена подача огнетушащего аэрозоля в защищаемый объем не позднее, чем через 1 мин после возникновения загорания.

Предусмотрены даже ограничения на оперативное применение ГОА из-за определенной токсичности образующихся продуктов. Запрещается их применение:

- в помещениях, где находятся люди;
- при отсутствии признаков пламенного горения;
- в случаях, когда выход аэрозоля через неплотности и проемы в горящем помещении будет препятствовать эвакуации людей.

Даже крайне ограниченное по времени нахождение человека в «атмосфере» огнетушащего аэрозоля может представлять опасность его здоровью. Поэтому необходимо обеспечивать условия эвакуации людей из помещений, оборудованных ГОА, и своевременное оповещение (звуковое и световое) о предстоящем их запуске.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируются огнетушащие средства?
2. Каков механизм огнетушащего действия воды?
3. Обозначьте область применения нейтральных газов в пожаротушении.
4. Опишите механизм огнетушащего действия ХАИ.
5. Каковы основные параметры огнетушащих пен?
6. Опишите механизм огнетушащего действия ПОС.
7. Охарактеризуйте аэрозолеобразующие огнетушащие составы, область их применения.

8. Основные параметры прекращения горения на пожарах

8.1. Интенсивность подачи, удельный расход огнетушащего вещества, показатели эффективности тушения

В целом процесс тушения пожаров для всех видов горючих веществ и материалов характеризуется следующими параметрами: время тушения, интенсивность подачи, удельный расход.

Время тушения τ_t — время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения (с, мин).

Интенсивность подачи J — количество огнетушащего вещества, подаваемое на 1 м² площади пожара в секунду (л/(м²·с)).

Удельный расход $g_{уд}$ — количество огнетушащего вещества (л, кг), израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м² площади

пожара, либо на 1 м³ объема помещения, либо на 1 м³ фонтанирующего газа (л/м², кг/м², л/м³, кг/м³):

- при тушении по поверхности

$$g_{уд} = j \tau_T = \frac{g_c}{S_{п}} \tau_T,$$

- при объемном тушении

$$g_{уд} = \frac{g_c}{V_{пом}} \tau_T,$$

где $V_{пом}$ — объем помещения, м³; q_c — секундный расход огнетушащего вещества, л/с, кг/с; $S_{п}$ — площадь пожара, м².

Теоретический удельный расход определяется по формуле (л/м³, л/м², кг/м², кг/м³)

$$g_{уд}^0 = \frac{Q_{треб}}{Q_{охл}},$$

где $Q_{треб}$ — количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения или поверхности материала для снижения температуры пламени до температуры потухания, кДж/м³, кДж/м²; $Q_{охл}$ — охлаждающий эффект от единицы огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг, кДж/м³.

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества — это максимальное количество тепла, которое может быть отведено единицей объема или массы огнетушащего вещества от 1 м² поверхности горения или 1 м³ объема зоны горения.

Теоретическая интенсивность подачи I^0 при тушении пламени над поверхностью определяется по формуле (л/(м²·с), кг/(м²·с))

$$I^0 = \frac{q_{треб}^{отв}}{Q_{охл}}.$$

Удельная интенсивность теплоотвода от пламени $q_{треб}^{отв}$, требуемая для его охлаждения до температуры потухания, определяется соотношением (кВт/м²)

$$q_{треб}^{отв} = (1 - f) k q_{п}'$$

где f — коэффициент теплопотерь излучением (для жидкостей $f \approx 0,3$; $k \approx 0,28$; для твердых материалов $f \approx 0,4$; $k \approx 0,22$); k — коэффициент снижения температуры пламени до температуры потухания; $q_{п}'$ — приведенная теплота пожара, кВт/м².

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивности подачи. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества оказывается равной или меньше критической, тушение не достигается, $\tau_t \rightarrow \infty$.

При тушении пенами критической является интенсивность подачи, равная интенсивности разрушения пены.

При тушении газовыми составами и аэрозолями критической является интенсивность утечки огнетушащего вещества из заполняемого объёма помещения.

При тушении водой по поверхности — интенсивность подачи, компенсирующая лучистый тепловой поток к горячей поверхности от собственного пламени и внешних источников излучения.

Интенсивность подачи, при которой удельный расход огнетушащего вещества минимален, считается *оптимальной* $J_{\text{опт}}$.

Эффективность применяемого огнетушащего вещества и способ подачи можно оценить с помощью показателя эффективности тушения $\Pi_{\text{эф}}$ и коэффициента использования $K_{\text{и}}$:

- показатель эффективности тушения

$$\Pi_{\text{эф}} = \frac{1}{J\tau_t^2} = \frac{1}{g_{\text{уд}}\tau_t};$$

- коэффициент использования огнетушащего вещества
— теоретический

$$K_{\text{и}}^0 = \frac{g_{\text{уд}}^0}{g_{\text{уд}}},$$

где $g_{\text{уд}}^0$ — теоретический удельный расход, л/м²; $g_{\text{уд}}$ — фактический удельный расход, л/м²;

- практический

$$K_{\text{и}} = \frac{g_{\text{уд}}^{\text{min}}}{g_{\text{уд}}},$$

где $g_{\text{уд}}^{\text{min}}$ — минимальный при данной площади пожара удельный расход огнетушащего вещества, полученный при тушении реальных пожаров, л/м².

Выбор огнетушащих веществ и способов их подачи зависит от того, какие условия необходимы и достаточны для прекращения горения данного вида горючего вещества в данных условиях пожара.

8.2. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пожаров водой

Вода и водные растворы являются огнетушащими веществами преимущественно охлаждающего действия. Кроме того, водяной пар оказывает дополнительное разбавляющее действие. В результате температура пламени достигает температуры потухания.

Водные растворы содержат различные добавки, снижающие поверхностное натяжение (пенообразователи, смачиватели), уменьшающие или, наоборот, увеличивающие вязкость воды и др. Содержание этих веществ в рабочих растворах, как правило, не превышает 4%, и их влияние на теплофизические свойства воды можно не учитывать.

Значения основных теплофизических параметров воды, используемые при расчетах, приведены в п. 7.2.

Теоретический *охлаждающий* эффект 1 л воды $Q_{\text{охл}}$ (кДж/л)

- при объёмном тушении

$$Q_{\text{охл}} = c_v (T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_{\text{пара}} (T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}),$$

- при тушении по поверхности

$$Q_{\text{охл}} = c_v (T_{\text{кип}} - T_0) + r,$$

где $T_{\text{пот}}$ – температура потухания, °С.

Разбавляющий эффект воды, как уже отмечалось, заключается в том, что при полном ее испарении из 1 л образуется 1720 л пара, который является огнетушащим веществом.

Практически, как показывает статистический анализ данных реальных пожаров, величина удельного расхода воды вполне точно может быть описана уравнением типа

$$g_{\text{уд}} = f(S_{\text{п}}),$$

которое для ординарных пожаров площадью $\geq 40 \text{ м}^2$ может быть представлено в виде

$$g_{\text{уд}} = 0,5 S_{\text{п}}.$$

Необходимо помнить, что рассчитанные значения удельных расходов воды могут существенно отличаться от реальных результатов. Практически невозможно осуществить подачу воды в факел пламени, доведя его до полного потухания, так как не вся вода попадает при распыле в факел пламени, не вся вода, попавшая в факел

пламени, нагреется до 100° С, не вся нагретая до кипения вода испарится, не все образовавшиеся пары воды прогреются до 1000° С.

8.3. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пожаров газовыми огнетушащими составами

Газовые огнетушащие составы (ГОС) являются веществами преимущественно объемного действия. Они прекращают горение в газовой фазе. К этому классу огнетушащих веществ относятся *нейтральные газы* (диоксид углерода, азот, водяной пар, гелий, аргон) и *химически активные ингибиторы* — хладоны. Их эффективность при тушении твердых горючих материалов, склонных к тлению, определяется теплоемкостью и способностью ингибировать горение на твердой поверхности.

При тушении пожаров в помещениях методом затопления пламенное горение прекращается, когда концентрация газового состава во всем объеме становится равной огнетушащей $\phi_{огн}$.

Зависимость времени тушения пламени в объеме помещения от расхода газового состава определяется формулой

$$\tau_T = \frac{2V_{пом}a_{огн}}{2V_{гос} - V_{пг}a_{огн}},$$

где $V_{гос}$ — расход (скорость подачи) ГОС, м³/с; $V_{пг}$ — расход (скорость удаления) продуктов горения через проем, м³/с; $V_{пом}$ — объем помещения, м³; $a_{огн}$ — огнетушащая концентрация газа, выраженная в объемных долях.

Здесь (см. рис. 15)

$$V_{пг} = \frac{2}{3}\mu \frac{(S_{общ} - S_{пр})}{\rho_{пг}} \sqrt{2g(H_{пр} - h_0)\rho_{пг}(\rho_v - \rho_{пг})},$$

где μ — коэффициент сопротивления проема ($\mu \geq 0,65$); $H_{пр}$ — высота проема, м; h_0 — высота плоскости равных давлений относительно нижней отметки проема, м; $\rho_{пг}$ — плотность продуктов горения, кг/м³; ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; $S_{общ}$ — площадь проема, м²; $S_{пр}$ — площадь приточной части проема, м² ($S_{пр} = Bh_0$, где B — ширина проема, м); g — ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с².

Критический расход газового состава, при котором $\tau_T \rightarrow \infty$, равен

$$V_{\text{гос}}^{\text{кр}} = \frac{1}{2} V_{\text{пг}} a_{\text{огн}}.$$

Массовый секундный расход газа (кг/с)

$$V_{\text{гос}}^{\text{мас}} = V_{\text{гос}} \rho_{\text{гос}}.$$

Удельный расход газа (кг/м³) равен

$$g_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{пом}} \tau_{\text{т}}}{V_{\text{гос}}^{\text{мас}}}.$$

Для прекращения гетерогенного горения необходимо дополнительно охлаждать поверхность материала до температуры как минимум начала пиролиза. На это требуется дополнительное количество газа. Поэтому огнетушащая концентрация газового состава задается больше, чем при тушении нетлеющих материалов.

Наибольшей охлаждающей способностью обладают газовые огнетушащие составы, выбрасываемые из подающего устройства в жидком или твердом состоянии.

Диоксид углерода при повышении давления при температурах от +31 до -57° С сжижается. Ниже -57° С он переходит в твердое состояние (сухой лед). При обратном переходе в газообразное состояние из 1 кг жидкого диоксида углерода образуется примерно 500 л газа. Теплота парообразования жидкого CO₂ при 0° С равна 235,1 кДж/кг.

Если выброс газообразного диоксида углерода происходит в режиме дросселирования, он переходит в твердое состояние и выбрасывается в виде хлопьев, похожих на снежные, с температурой -78,5° С. В очаге пожара они превращаются в газ, минуя жидкую фазу. Такое же превращение испытывает твердый гранулированный диоксид углерода.

Теплота сублимации твердого диоксида углерода 574,0 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газообразного CO₂ в интервале 0–1000° С составляет 1,99 кДж/(м³·К) или 1,47 кДж/(кг·К).

Теоретический охлаждающий эффект диоксида углерода $Q_{\text{охл}}$, кДж/кг:

- твердого при объемном тушении

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p (T_{\text{пот}} - T_0),$$

где $r = 574,0$ кДж/кг; $c_p = 1,47$ кДж/(кг·К); $T_0 = -78,5$ °С;

$T_{\text{пот}} = 900–1000$ °С;

- твердого при охлаждении прогретого слоя жидкости

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p (T_{\text{кип}} - T_0),$$

где $c_p = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости, °С;

- газообразного при объемном тушении

$$Q_{\text{охл}} = c_p (T_{\text{пот}} - T_0).$$

Азот сжижается при -196°С . При обратном переходе 1 л жидкого азота, испаряясь и нагреваясь до 20°С , образует 250 л газа. Удельная теплота парообразования жидкого азота при температуре кипения – $199 \text{ кДж}/\text{кг}$. Средняя удельная теплоемкость газообразного азота $1,05 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ в интервале $0–100^\circ \text{С}$.

8.4. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пенами

При тушении пеной твердых горючих материалов главным является процесс охлаждения. При этом слой пены, нанесенный на поверхность горючего материала, экранирует внешний лучистый тепловой поток, который падает от непотушенных участков, соседних горящих поверхностей и т. п. Постепенно разрушаясь, пена выделяет раствор пенообразователя, который пропитывает горючий материал и понижает его температуру. Поскольку раствор пенообразователя имеет меньшее поверхностное натяжение, чем вода, он обладает большей впитывающей способностью.

Следует помнить, что при увеличении площади пожара увеличивается удельный расход огнетушащего средства на единицу площади, соответственно, увеличивается и интенсивность подачи. Это объясняется тем, что происходит скопление пены в местах слива и связанное с этим ее разрушение и ухудшение распределения по площади очага горения. При тушении очага пожара большой площади возможности равномерного распределения пены довольно ограничены, т. е. возникает проблема равномерного распределения пены по всей поверхности без ее перерасхода.

Вторая причина перерасхода связана с тем, что пена в динамическом и статическом состояниях имеет различные физические свойства. Процесс прекращения горения жидкости пеной можно условно разделить на две стадии: растекание пены по зеркалу жид-

кости и накапливание изолирующего слоя. Изолирующая способность пены, находящейся в движении, уменьшается. В спокойном состоянии пена создает «уплотняющий слой». Однако переход к статическому состоянию происходит во времени (до 20 с).

На обеих стадиях происходит разрушение пены под действием различных факторов. Накопление пены на поверхности горючего может начаться, если интенсивность ее подачи больше интенсивности разрушения. Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется *критической* $J_{кр}$.

Очевидно, что объем слоя пены, накопленного за время тушения, равен разности объемов поданной и разрушенной пены. Соответственно, интенсивность накопления пены

$$J_{нак} = J - J_{кр}.$$

Отсюда критическая интенсивность подачи раствора равна

$$J_{кр} = J - J_{нак}.$$

Если известен объем пены $V_{нак}$ (л), накопленный за время тушения, величину $J_{нак}$ можно вычислить по формуле

$$J_{нак} = \frac{10^3 V_{нак}}{\tau_t S_p K_{пены}} = \frac{10^3 H_{пены} S_p}{\tau_t S_p K_{пены}} = \frac{10^3 H_{пены}}{\tau_t K_{пены}}.$$

где $H_{пены}$ — толщина накопленного слоя пены, м; S_p — площадь зеркала жидкости (резервуара), м²; τ_t — время подачи пены, с; $K_{пены}$ — кратность пены.

Оптимальной является интенсивность подачи $J_{опт}$, при которой удельный расход $g_{уд}$ раствора пенообразователя минимален. Зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$\tau_t = B \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}},$$

где B — коэффициент, зависящий от вида пенообразователя и параметров пены (мин).

Так как $q_{уд} = J\tau_t$, можно записать, что

$$g_{уд} = JB \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}.$$

Для определения $J_{\text{опт}}$ строят график зависимости $g_{\text{уд}} = f(J)$ и находят значение J , при котором $g_{\text{уд}}$ минимален. Коэффициент B можно принять равным 1, так как он не влияет на координаты минимума.

Характеристикой изолирующей способности пены является высота тушащего слоя $H_{\text{пены}}$, м

$$H_{\text{пены}} = 10^{-3}(J - J_{\text{кр}})K_{\text{пены}}\tau_r.$$

Тушение жидкости может быть достигнуто при подаче на ее поверхность такого слоя пены, через который пары горючей жидкости не смогут прорваться в зону горения. Такой слой пены называется минимальным. Высоту минимального слоя пены H_{min} можно определить по формуле, которая выводится из анализа взаимодействия сил, действующих на образовавшийся под слоем пены газовый пузырек, заполненный упругими парами горючей жидкости:

$$H_{\text{min}} = [P_{\text{пу}} + \rho_{\text{п}}(d_r/3)]/[(4\sigma/d_r) + \rho_{\text{п}}],$$

где $P_{\text{пу}}$ — давление упругих паров горючей жидкости; d_r — диаметр газовых пузырьков горючей жидкости; $\rho_{\text{п}}$ — плотность пены; σ — энергия сдвига.

Это выражение характеризует изолирующую способность пены в зависимости от ее параметров для случая, когда диаметр газового пузырька соизмерим с толщиной пенного слоя.

8.5. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении порошковыми и аэрозольными огнетушащими составами

Порошковые огнетушащие составы класса АВС при нагреве до температуры порядка 120° С начинают плавиться с поглощением тепла. Кроме того, на тлеющей поверхности они образуют вязкую полимерную пленку, затрудняющую доступ кислорода. Экспериментальный охлаждающий эффект $Q_{\text{охл}}$ порошков данного класса на основе диаммонийфосфата при нагреве до 600–800° С (что примерно соответствует температуре поверхности древесины при горении) составляет 1769–2000 кДж/кг. На практике показателем огнетушащей способности порошков класса АВС является удель-

ный расход ($\text{кг}/\text{м}^2$) порошка на тушение модельного очага пожара класса А (штабеля из брусков древесины).

ПОС класса ВС на горящей поверхности твердых материалов практически не удерживаются, изолирующего и охлаждающего действия не оказывают. Показателем огнетушащей способности порошков класса ВС является удельный расход ($\text{кг}/\text{м}^2$) порошка на тушение модельного очага пожара класса В (противня с горючей жидкостью).

Аэрозолеобразующие огнетушащие составы (АОС) относятся к веществам объемного действия. Огнетушащая способность аэрозолей в несколько раз выше, чем у газовых и порошковых огнетушащих составов.

Огнетушащая способность АОС в целом характеризуется величиной минимального удельного расхода ($\text{кг}/\text{м}^3$) огнетушащего средства при объемном тушении пожаров.

8.6. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении ТГМ

Наиболее эффективным способом тушения ТГМ любого типа является принудительное охлаждение непосредственно поверхности горения. Условие тушения ТГМ выполняется, если огнетушащее вещество подается на поверхность горения с такой интенсивностью, что за время тушения отбирает тепло, поступающее к поверхности, а также тепло, запасенное в прогретом слое за время горения.

В этом случае теоретическое, минимально возможное время тушения по механизму отвода тепла от поверхности τ_t (с) равно

$$\tau_{min} = \frac{Q_{зап}}{JQ_{охл} - q_{вн}}.$$

Удельное количество тепла $Q_{зап}$, аккумулируемое в прогретом слое плавящихся материалов (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты), определяется по формуле

$$Q_{зап} = \frac{\rho\lambda}{v'_m} (T_{кип} - T_{всп}),$$

где λ — теплопроводность горящего материала, $\text{кВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $T_{кип}$ и $T_{всп}$ — соответственно температура кипения и вспышки расплавленного материала, $^{\circ}\text{C}$.

Запас тепла $Q_{\text{зап}}$, аккумулированный за время свободного горения $\tau_{\text{г}}$ прогретым слоем ТГМ, склонных к гетерогенному горению, равен

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v'_{\text{прм}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{г}},$$

где $q_{\text{вн}}$ – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м².

Величина исходящего от горящей поверхности конвективного теплового потока $q_{\text{конв}}$, кВт/м², определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза

$$q_{\text{конв}} = v'_{\text{прм}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}),$$

где $c_p \approx 3,7$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость выделяющихся газов; $T_{\text{пов}} \approx 700^\circ\text{C}$ – температура поверхности при горении; $T_{\text{пир}} \approx 200^\circ\text{C}$ – температура начала пиролиза.

Теплота пиролиза L зависит от вида горючего материала (табл. 6). Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза $L_{\text{экз}}$ присутствует при горении древесины и содержащих ее композиционных материалов. В расчетах $L_{\text{экз}}$ приближенно можно принимать равным 6% от низшей теплоты сгорания.

Таблица 6

Удельная теплота пиролиза некоторых твердых веществ

Горючее вещество	Теплота пиролиза L, кДж/кг
Фенопласт	1640
Полиизоциануратный пенопласт*	3670
Полиэтилен	2320
Полипропилен	2030
Поликарбонат	2070
Полистирол*	1760
Пенофенопласт*	3740
Полиметилметакрилат*	1620
Пенополиуретан мягкий*	1220
Пенополиуретан жесткий*	1190
Пенополистирол*	1360

*Содержащие антипирен

При $J = q_{\text{вн}}/Q_{\text{охл}}$, т. е. когда подача огнетушащего вещества на поверхность компенсирует только внешние тепловые потоки $q_{\text{вн}}$, $\tau_{\text{г}} \rightarrow \infty$. Такая интенсивность подачи является критической $J_{\text{кр}}$.

Минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего прогретого слоя τ_0 . Это физическое время определяется термическим сопротивлением материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20 с.

Таким образом, теоретическое время прекращения горения при тушении ТГМ по поверхности определяется по формуле

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0.$$

Умножив обе части этой формулы на J , получим выражение для удельного расхода

$$g_{\text{уд}} \geq \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} J + \tau_0 J.$$

Оптимальная интенсивность подачи, при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества, находится дифференцированием этого уравнения по J (л/(м²·с)). Приравняв первую производную $dg_{\text{уд}}/dJ$ к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{q_{\text{вн}} Q_{\text{зап}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right).$$

Охлаждающий эффект $Q_{\text{охл}}$ огнетушащего вещества зависит от его агрегатного состояния, теплоты фазового перехода, теплоемкости, способа тушения.

8.7. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении горючих жидкостей

При тушении ГЖ интенсивность теплоотвода должна быть не ниже интенсивности теплового потока, затрачиваемого в единицу времени на образование горючей концентрации пара над поверхностью жидкости и формирование прогретого слоя. Для жидкостей данное условие описывается следующим уравнением

$$q_{\text{трѐб}}^{\text{отв}} = [c_p(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_m' + Q_{\text{зап}}/\tau_T,$$

где c_p — удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К); $T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{всп}}$ — температура кипения и вспышки соответственно, °С; r — удельная теплота парообразования, кДж/кг; v_m' — удельная мас-

совая скорость выгорания, кг/(м²·с); $Q_{\text{зап}}$ — количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое, кДж/м²; τ_t — время тушения, с.

Если огнетушащее вещество подается с интенсивностью J , поступает на поверхность прогретого слоя без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность $Q_{\text{охл}}$, то интенсивность теплоотвода будет равна

$$q_{\text{треб}}^{\text{отв}} = JQ_{\text{охл}}.$$

Приравнявая приведенные соотношения, получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя

$$\tau_t = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - [c_p(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v'_m},$$

где $Q_{\text{охл}}$ — охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л или кДж/кг.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель этой формулы обращается в 0, является критической. В этом случае $\tau_t \rightarrow \infty$ и тушение становится невозможным.

Критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества $J_{\text{кр}}$, л/(м²·с) или кг/(м²·с) при таком способе тушения жидкости, следовательно, равна

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c_p(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v'_m}{Q_{\text{охл}}}.$$

Тепло $Q_{\text{зап}}$, аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\rho\lambda}{v'_m}(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}),$$

где λ — теплопроводность жидкости, кВт/(м·К); ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные параметры характеризуют прекращение горения огнетушащими средствами?
2. В чем особенности расчета основных параметров прекращения горения при тушении пожаров водой?
3. Опишите особенности расчета основных параметров прекращения горения при тушении пожаров порошковыми огнетушащими составами.

4. Каковы особенности расчета основных параметров прекращения горения при тушении пожаров газовыми огнетушащими составами?
5. В чем особенности расчета основных параметров прекращения горения при тушении пенами?
6. Назовите основные параметры тушения пожаров ТГМ.
7. Как рассчитать основные параметры тушения пожаров горючих жидкостей?

Вопросы итогового контроля знаний

1. Назовите основные физико-химические явления при пожарах
2. Механизм формирования опасных факторов пожара
3. Назовите основные динамические характеристики пожаров газовых фонтанов
4. Назовите основные динамические характеристики пожаров резервуаров
5. Какими показателями характеризуется динамика открытых пожаров твердых веществ и материалов?
6. Особенности пожаров на складах лесоматериалов
7. Особенности лесных пожаров
8. Особенности торфяных пожаров
9. Особенности степных пожаров
10. Какими показателями характеризуется динамика внутренних пожаров?
11. Теплообмен при внутренних пожарах
12. Газообмен при внутренних пожарах
13. Опишите характерные схемы развития пожаров в зданиях различной планировки
14. Как определяется положение нейтральной зоны при внутренних пожарах?
15. Тепловая теория прекращения горения
16. Классификация способов прекращения горения на пожаре
17. Основные способы подачи огнетушащих средств
18. Необходимое условие для прекращения горения газов
19. Необходимое условие для прекращения горения горючих жидкостей
20. Необходимое условие для прекращения горения ТГМ
21. Классификация огнетушащих веществ

22. Вода как огнетушащее средство
23. Нейтральные газы в пожаротушении
24. Химически активные ингибиторы
25. Основные параметры и виды пен. Область применения
26. Порошковые огнетушащие средства
27. Аэрозолеобразующие составы
28. Основные параметры прекращения горения на пожарах
29. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пожаров водой
30. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пожаров газовыми огнетушащими составами
31. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении пенами
32. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении порошковыми составами
33. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении ТГМ
34. Расчет основных параметров прекращения горения при тушении горючих жидкостей
35. Принципы оптимизации основных параметров прекращения горения

Библиографический список

Фонд научной библиотеки ТГУ

1. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва : учеб. / А.Я. Корольченко. — М. : Пожнаука, 2007. — 265 с.
2. Баратов, А.Н. Пожарная безопасность : учеб. пособие для техн. вузов / А.Н. Баратов, В.А. Пчелинцев. — М. : АСВ, 1997. — 171 с.
3. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук. — М. : Химия, 1990. — Кн. 1. — 496 с.
4. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук. — М. : Химия, 1990. — Кн. 2. — 384 с.
5. Добрынина, Т.С. Пожарная безопасность : лаб. практикум / Т.С. Добрынина. — Тольятти : ТГУ, 2008. — 87 с.
6. Добрынина, Т.С. Пожарная безопасность : учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины / Т.С. Добрынина. — Тольятти : ТГУ, 2007. — 138 с.
7. Семехин, Ю.Г. Пожар: способы и средства пожаротушения / Ю.Г. Семехин. — Ростов н/Д : Феникс, 2007. — 91 с.

Другие фонды (библиотеки, магазины)

8. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. — М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980. — 256 с.
9. Марков, В.Ф. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, М.П. Миронов. — Екатеринбург : УроРАН, 2009. — 274 с.
10. Бобков, С.А. Примеры и задачи по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожара» : учеб. пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. — 98 с.

ГЛОССАРИЙ

Время тушения τ_t , — время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения (с, мин).

Зона горения — часть пространства, в которой протекают процессы термической подготовки горючих веществ и само горение; зона горения включает объем, ограниченный фронтом пламени и поверхностью горящего вещества.

Зона задымления — примыкающая к зоне горения часть пространства, в которой невозможно пребывание людей без средств защиты органов дыхания или осложнено ориентирование в результате недостаточной видимости.

Зона теплового влияния — прилегающая к зоне горения часть пространства, в границах которой протекают процессы теплообмена между поверхностью зоны горения и окружающими конструкциями и веществами.

Интенсивность газообмена I_G — количество воздуха, который притекает в единицу времени к единице площади пожара ($\text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$).

Интенсивность подачи J — количество огнетушащего вещества, подаваемое на 1 м^2 площади пожара в секунду ($\text{л}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$).

Коэффициент избытка воздуха — отношение фактического секундного массового расхода воздуха, поступающего в зону горения, к теоретически необходимому секундному массовому расходу воздуха для осуществления процесса горения.

Коэффициент поверхности горения (коэффициент пожарной нагрузки) K_n — отношение площади поверхности горения к площади пожара.

Линейная скорость распространения пожара v_d — расстояние, которое проходит фронт пожара за единицу времени ($\text{м}/\text{с}$).

Огнетушащие средства (ОС) — различные вещества и материалы, с помощью которых непосредственно создаются различные условия прекращения горения.

Площадь поверхности горения характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении (м^2).

Площадь пожара — площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость (м^2).

Пожар — неконтролируемое горение вне специального ограждения, приносящее материальные и моральные убытки.

Пожары, регулируемые вентиляцией (ПРВ) — пожары, которые протекают при ограниченном содержании кислорода в газовой среде помещения и избытке горючих веществ и материалов.

Пожары, регулируемые пожарной нагрузкой (ПРН) — пожары, протекающие при избытке воздуха для горения. Развитие такого пожара зависит от количества пожарной нагрузки.

Скорость выгорания (массовая) v_m — количество вещества, которое выгорает в единицу времени (кг/с); массовая скорость выгорания зависит прежде всего от природы вещества, интенсивности газообмена, времени развития пожара.

Скорость выгорания (приведенная массовая) $v'_{прм}$ — масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Скорость выгорания (удельная массовая) v'_m — количество вещества, которое выгорает в единицу времени с единицы площади пожара ($\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Стехиометрический состав горючей смеси — состав смеси, в которой окислителя ровно столько, сколько необходимо для полного окисления топлива без остатка избыточного кислорода.

Теплота пожара — количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени (кВт).

Удельная пожарная нагрузка $P_{пож}$ — количество теплоты, которое может выделиться с единицы площади, занимаемой горящими материалами при пожаре ($\text{МДж}/\text{м}^2$).

Удельную горючую нагрузку измеряют как массу всех горючих и трудногорючих материалов, которая приходится на единицу занимаемой ими площади ($\text{кг}/\text{м}^2$).

Удельный расход $G_{\text{уд}}$ — количество огнетушащего вещества (л, кг), израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м^2 площади пожара, либо на 1 м^3 объема помещения, либо на 1 м^3 фонтанирующего газа ($\text{л}/\text{м}^2$, $\text{кг}/\text{м}^2$, $\text{л}/\text{м}^3$, $\text{кг}/\text{м}^3$).

Фронт пожара — часть периметра пожара, на которой распространение пожара происходит наиболее интенсивно.

Содержание

Введение.....	3
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЖАРАХ.....	6
МОДУЛЬ I. ОТКРЫТЫЕ ПОЖАРЫ.....	12
1. Пожары газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов.....	12
2. Пожары резервуаров.....	21
3. Открытые пожары твердых горючих материалов (ТГМ).....	26
МОДУЛЬ II. ВНУТРЕННИЕ ПОЖАРЫ.....	32
4. Динамика внутренних пожаров.....	32
5. Тепло- и газообмен при пожаре в помещении.....	41
МОДУЛЬ III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ.....	52
6. Тепловая теория и способы прекращения горения.....	52
7. Огнетушащие вещества, их свойства, область применения.....	62
8. Основные параметры прекращения горения на пожарах.....	86
Вопросы итогового контроля знаний.....	100
Библиографический список.....	102
ГЛОССАРИЙ.....	103

Учебное издание

Рашоян Ирина Игоревна

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ
И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Учебное пособие

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *И.И. Шишкина*

Подписано в печать 11.10.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 6,22.

Тираж 200 экз. Заказ № 1-80-12.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

