

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков

# Физико-химические основы развития и тушения пожаров

Допущено Министерством Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве  
учебного пособия для высших образовательных учреждений  
МЧС России

Москва  
2014

УДК 544  
ББК 38.96  
Б72

Рецензенты:

*С. Г. Цариченко*, доктор технических наук, профессор,  
заместитель начальника ФГУ ВНИИПО МЧС России;

*А. Я. Корольченко*, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Пожарная безопасность» МГСУ;

*В. О. Дежкин*, начальник отдела  
Департамента пожарно-спасательных сил,  
специальной пожарной охраны  
и сил гражданской обороны МЧС России

**Бобков С. А.**

Б72 Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб.  
пособие / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – М. :  
Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.

ISBN 978-5-9229-0084-3

В учебном пособии рассматриваются основные процессы, протекающие при пожарах, развивающихся на открытом пространстве и внутри помещений, а также сопутствующие им явления – вскипание и выброс жидкости при пожарах резервуаров, общая и объемная вспышка в помещениях. Также рассматриваются физико-химические основы прекращения горения, механизмы действия, области и особенности практического использования различных огнетушащих веществ.

УДК 544  
ББК 38.96



© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2014

# Предисловие

---

Дисциплина «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» является базовой для изучения таких специальных дисциплин, как «Пожарная тактика», «Пожарная техника», «Экспертиза пожаров», «Пожарная профилактика в технологических процессах», «Пожарная профилактика в строительстве», «Экология пожаров» и др. В свою очередь, она является логическим продолжением дисциплины «Теория горения и взрыва», рассматривающей условия возникновения и параметры процесса горения.

Первое учебное пособие по данной дисциплине было подготовлено и выпущено ее создателями И. М. Абдурагимовым, В. Ю. Говоровым, В. Е. Макаровым в 1980 году и отражало последние на то время представления о процессах, протекающих при уже возникших пожарах, явлениях их сопровождающих, а также о механизмах прекращения горения с помощью различных огнетушащих веществ.

Настоящая книга написана на основе многолетнего опыта преподавания дисциплины в Академии ГПС МЧС России. При ее подготовке авторы использовали опубликованные результаты научных разработок ВНИИПО, кафедры «Процессы горения» Академии ГПС МЧС России, отечественных и зарубежных исследователей, а также собственный опыт исследования и тушения пожаров. Учебное пособие предназначено для слушателей очного и заочного факультетов на базе общего и специального образования, обучающихся по специальности «Пожарная безопасность».

Главы 1, 5, п. 7.2 написаны канд. техн. наук, доц. С. А. Бобковым, гл. 2, 3 – канд. техн. наук, доц. С. А. Бобковым при участии канд. техн. наук П. В. Комракова, гл. 4 – совместно канд. техн. наук П. В. Комраковым и А. В. Бабуриным, п. 7.3 – канд. техн. наук П. В. Комраковым, гл. 6, пп. 7.1, 7.4 – совместно канд. техн. наук, доц. С. А. Бобковым и А. В. Бабуриным, п. 7.5 – А. В. Бабуриным.

# 1. Пожар как комплекс физических и химических процессов и явлений. Основные понятия и определения

---

## 1.1. Основные процессы, протекающие на пожаре

*Пожар – это сложный комплекс физических и химических процессов, среди которых основным является процесс горения.*

Как правило, на пожарах горение является диффузионным, т. е. скорость химической реакции зависит от скорости притока воздуха извне, а также от скорости удаления образующихся газообразных продуктов. Данный процесс называется *газообменом*. По характеру газообмена пожары делятся на *открытые* и *внутренние*. Первые протекают на открытом пространстве, вторые – в помещениях.

При горении на открытых пожарах приток воздуха в зону химических реакций зависит главным образом от газодинамического режима образования горючей смеси. Если поток горючего газа или пара ламинарный, соотношение горючего и окислителя в смеси, поступающей в зону реакции, определяется законами диффузии. Если поток турбулентный – к диффузии добавляется механическое перемешивание реагирующих компонентов. Отток продуктов горения из зоны реакции практически не лимитирован.

Направление и скорость распространения открытых пожаров зависят от размеров факела пламени, распределения горючих материалов или объектов, метеорологических условий.

На внутренних пожарах параметры горения, возможность и скорость распространения пожара определяются не только физико-химическими свойствами, количеством и характером распределения горючих материалов, но и такими факторами, как проемность помещения, его высота, размеры очага. Если в силу ряда причин процесс горения не распространился на все горючие предметы или материалы, находящиеся в помещении, внутренний пожар называется *локальным*; если горением охвачено все помещение – *объемным*.

По своей природе процесс горения является химической реакцией между горючим веществом и окислителем, которая протекает с выделением тепла. Часть тепла расходуется в зоне химических реакций на нагрев

продуктов горения, часть – передается в окружающую среду, часть – идет на нагрев горючих материалов и поддержание горения. Данный процесс является *теплообменом*.

Во время пожара присутствуют все три вида теплообмена. Однако их соотношение может быть разным в зависимости от вида пожара, стадии его развития, свойств горючего вещества.

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

*Конвективный теплообмен* значительно присутствует на всех стадиях пожара. Как известно, он обусловлен движением потоков нагретых газов. Плотность газообразных продуктов горения значительно меньше плотности воздуха вследствие высокой температуры первых. Это вызывает подъемную силу, под действием которой они перемещаются вверх. На открытых пожарах эти восходящие потоки практически не влияют на распространение пламени на уровне земли. Характер их движения (ламинарный или турбулентный) определяет условия образования смеси горючих газов с окислителем и параметры процесса горения.

При пожарах в помещениях влияние конвекции зависит от стадии пожара, интенсивности тепловыделения в очаге, геометрии помещения и других факторов. Например, при недостаточной вентиляции под потолком может скапливаться теплый воздух. Очаг пожара в самом начале его развития, как правило, является точечным с небольшой интенсивностью тепловыделения. В этом случае разность плотностей восходящих газов и воздуха по высоте помещения быстро убывает. Кроме того, факел, формируемый восходящими потоками, интенсивно охлаждается вследствие разбавления воздухом. Все это приводит к тому, что подъемная сила уменьшается и может стать недостаточной для преодоления сил вязкого сопротивления еще до того, как газовый поток достигнет потолка. В случаях, когда такая ситуация реализуется, помещение задымляется практически равномерно по всей высоте, что затрудняет эвакуацию людей.

По мере развития процесса горения температура газов в конвективной колонке повышается, ее высота увеличивается и достигает потолка. Газы растекаются вдоль потолка, вызывая конвективный перенос тепла в строительные конструкции. Постепенно в конвективные потоки вовлекается весь объем воздуха, находящегося в помещении, и начинают прогреваться горючие материалы, находящиеся далеко от очага пожара. Если среднеобъемная температура газовой среды превысит температуру воспламенения горючих материалов, может произойти мгновенный охват пламенем всего помещения. Это явление называется *общей вспышкой*.

Через различные щели, технологические и вентиляционные отверстия, пустоты в стенах и перекрытиях потоки нагретых газов проникают в другие помещения, способствуя распространению пожара по зданию, затрудняют или делают невозможной эвакуацию людей.

*Излучение* является определяющим видом передачи тепла на пожаре, так как его действие может проявляться на больших расстояниях. При прохождении теплового потока через газовую среду он ослабляется в результате поглощения и рассеяния лучистой энергии. Например, атмосферный воздух, содержащий частицы пыли и влаги во взвешенном состоянии, а также промышленные дымы имеют коэффициент ослабления 0,2–0,3.

На внутренних пожарах, в помещениях с низким потолком (обычно менее 3 м) пламя вместе с конвективной колонкой быстро достигает потолка и отклоняется в горизонтальном направлении. В результате этого увеличивается тепловой поток, действующий на материалы, расположенные внизу.

Если лучистый тепловой поток превышает критическую величину, то через определенное время его действия при появлении источника зажигания облучаемый материал воспламеняется. Зависимость времени воспламенения  $\tau_b$  от плотности падающего теплового потока описывается формулой

$$\tau_b = \frac{A}{(q - q_{кр})^n}, \quad (1.1)$$

где  $A, n$  – эмпирические коэффициенты,  $A = 4,36 \cdot 10^3$ ,  $n = 1,61$ ;

$q$  – падающий тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>;

$q_{кр}$  – критический тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>.

Величина  $q_{кр}$  зависит от вида горючего материала. Например, для чистой древесины она составляет 10–12 кВт/м<sup>2</sup>, для обугленной – 16–20 кВт/м<sup>2</sup>, для ДСП – 12 кВт/м<sup>2</sup>. При отсутствии источника зажигания может произойти также самовоспламенение поверхности. Так, сосновая древесина самовоспламеняется при тепловом потоке 33,5 кВт/м<sup>2</sup> через 120 с; хлопчатобумажная набивная ткань при тепловом потоке 29,8 кВт/м<sup>2</sup> – через 9 с.

По мере увеличения геометрических размеров очага при развитии пожара в помещении уменьшается количество воздуха, поступающего в конвективную колонку. Возрастает количество продуктов неполного сгорания и оптическая плотность дыма. Соответственно доля излучения в передаче тепла уменьшается, а конвекции – возрастает.

Для поддержания горения на пожаре необходим постоянный приток свежего воздуха в зону химических реакций и удаление из нее образующихся продуктов, т. е. газообмен. При пожарах на открытом пространстве происходит газообмен зоны химических реакций с окружающей средой. Он лимитируется практически только диффузией окислителя. При пожарах в помещениях газообменом фактически является вентиляция помещения

через проемы в ограждающих конструкциях, вызванная и регулируемая процессами горения и теплообмена. В то же время, чем больше расход поступающего воздуха, тем более интенсивно протекает процесс горения, выше интенсивность тепловыделения, быстрее развивается пожар.

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

Газообмен влияет на интенсивность тепловыделения при сгорании горючего вещества. Но самое главное, он определяет состав газовой среды в помещении очага пожара, в смежных помещениях и на путях эвакуации людей. Газы, выбрасываемые из горящих помещений, имеют высокую температуру, что приводит к предварительному подогреву сгораемых материалов и увеличению скорости распространения пожара. Кроме того, интенсивность поступления воздуха в помещение может быть недостаточной для полного сгорания газов, выделяемых горящим веществом. Тогда образование и воспламенение горючей смеси происходит также за пределами первоначального очага. В таких случаях новые очаги пожара могут возникать, причем одновременно, в самых неожиданных местах здания.

Таким образом, комплекс взаимосвязанных процессов, определяющих такое сложное явление, как пожар, можно представить в виде условного *«треугольника пожара»*: горение – газообмен – теплообмен.

## 1.2. Зоны пожара

Все пространство, в котором протекает пожар, и вокруг него принято делить на три зоны.

Зона горения – это часть пространства, в котором происходит процесс горения, как в гомогенном, так и в гетерогенном режимах. При пожарах газов и жидкостей зоной горения считается объем видимого пламени. Горение твердых горючих материалов (ТГМ) в силу ряда причин может быть беспламенным (гетерогенным). У некоторых ТГМ (табак, хлопок, войлок и др.) этот вид горения является преобладающим. В этих случаях зона горения совпадает с поверхностью горения. Для большинства же ТГМ на пожаре характерно наличие обоих видов горения.

На внутренних пожарах при полном охвате пламенем помещения зоной горения считается весь его объем. До этого момента, т. е. на стадии распространения пожара, в зону горения включаются объем пламени и тлеющие участки материала.

Зона теплового воздействия – это часть пространства, примыкающая к зоне горения, в которой процессы теплообмена приводят к заметному изменению состояния материалов и конструкций, а также делают невозможным пребывание людей без средств тепловой защиты.

Для людей граница зоны теплового воздействия определяется по двум параметрам: повышенной температуре – 70 °С и плотности теплового потока – 1,4 кВт/м<sup>2</sup>.

Для конструкций и материалов границей данной зоны является расстояние, на котором плотность падающего теплового потока равна критической (см. формулу (1.1)).

На внутренних пожарах зона теплового воздействия ограничена строительными конструкциями. Факел пламени, вырывающийся из проемов, облучает фасад здания и конструкции, расположенные выше. Принято считать, что при развившемся пожаре пламя достигает середины вышерасположенного этажа. Если горят два или больше этажей, расположенных один над другим, пламя вытягивается. Это объясняется тем, что газы, поступающие в факел из каждого этажа, не успевают сразу смешиваться с воздухом и горючая смесь образуется во время их движения в конвективной колонке. Граница зоны теплового воздействия, определяемая конвективными потоками в здании, зависит от вентиляции здания. Чем сильнее газы, выходящие из помещения с очагом пожара, разбавляются воздухом, тем ниже их температура и короче зона теплового воздействия.

Зона задымления – часть пространства, примыкающая к зоне горения и заполненная дымовыми газами в концентрациях, создающих угрозу жизни и здоровью людей или затрудняющих действия пожарных подразделений.

Угроза жизни и здоровью людей создается при увеличении оптической плотности дыма до предельного значения, достижении предельно допустимой концентрации токсичных компонентов дыма. Оптическая плотность  $D$  характеризует степень ослабления света при прохождении через слой дыма определенной толщины. Она выражается как десятичный логарифм отношения интенсивности лучей света в воздухе  $I_0$  к их интенсивности  $I_x$  после прохождения слоя дыма толщиной  $x$ :

$$D = \lg I_0 / I_x. \quad (1.2)$$

Как правило, при измерении  $D$  для характеристики плотности дыма принимают  $x = 1$  м. Чем выше оптическая плотность, тем меньше расстояние, на котором человек видит сквозь слой дыма. Если объект освещается



спереди (то есть человек видит его в отраженном свете), то дальность его видимости в дыму  $L$ , м, практически обратно пропорциональна оптической плотности  $D$  на 1 м:

$$L = 1 / D. \quad (1.3)$$

При освещении сзади контур объекта виден на большем расстоянии:

$$L = 2,5 / D. \quad (1.4)$$

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

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

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

### 1.3. Основные параметры пожаров

Для решения практических задач пожарной безопасности необходимо знать параметры, описывающие комплекс процессов, составляющих такое сложное явление, как пожар.

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

*Время свободного развития пожара*  $\tau_{св}$ , мин, ч, – время с момента возникновения горения до начала подачи огнетушащего вещества в очаг пожара.

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

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

*Коэффициент поверхности горения*  $K_{п.г}$  – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{п.г} = S_{п.г} / S_{п.} \quad (1.5)$$

Из данного выражения следует, что площадь горения превышает площадь пожара в  $K_{п.г}$  раз. Например, в современных квартирах значение  $K_{п.г}$  составляет 3–5. Следовательно, если площадь пожара 3 м<sup>2</sup>, то площадь горения и, соответственно, площадь тушения, составляет 9–15 м<sup>2</sup>.

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

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

Если горючая нагрузка состоит из ТГМ, то  $v_{л}$  зависит не только от скорости распространения пламени по поверхности ТГМ, но и от скорости его перехода с одного предмета на другой. Поэтому на  $v_{л}$  влияет также характер размещения горючих изделий и материалов на объекте, интенсивность теплового излучения, направление и скорость газовых потоков. При рассредоточенной горючей нагрузке интенсивности излучения от горящего предмета может быть недостаточно для воспламенения материалов соседних предметов. Тогда пожар не распространится на всю площадь объекта и останется локальным.

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

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

*Абсолютная массовая скорость выгорания*  $v_M^{abc}$  – масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени.

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

$$v_M^{уд} = v_M^{abc} / S_{п}. \quad (1.6)$$

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

$$v_M^{пр} = v_M^{abc} / S_{п.г}. \quad (1.7)$$

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

$$q_{п} = \beta v_M^{abc} Q_{н}, \quad (1.8)$$

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

$Q_{н}$  – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

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

*Коэффициент избытка воздуха* на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха  $G_B^{\phi}$  к требуемому  $G_B^0$ :

$$\alpha = G_B^{\phi} / G_B^0. \quad (1.9)$$

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

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

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

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

$$p_{г.н} = \frac{\sum m_i}{S}, \quad (1.10)$$

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

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

*Площадь размещения* называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если участки в помещении, на которых находятся горючие вещества и материалы, не разделены преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых больше требуемых, площадь размещения равна площади пола. В складских помещениях при стеллажном хранении площадью размещения считается суммарная площадь стеллажей, занятая горючим материалом.

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

$$g_{п.н} = \frac{\sum m_i Q_{ni}}{S}, \quad (1.11)$$

где  $Q_{ni}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего вещества или материала, кДж/кг.

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

### Контрольные вопросы

1. По какому признаку пожары делятся на открытые и внутренние?
2. Назовите основные отличительные особенности процесса горения на открытых и внутренних пожарах.
3. В чем заключается отличие «треугольника пожара» от «треугольника горения»?
4. Какие виды теплообмена присутствуют на пожаре?
5. Назовите основные отличительные особенности конвективного теплообмена на открытых и внутренних пожарах.
6. Дайте характеристику зонам пожара.
7. В чем заключается отличие площади пожара от площади горения?
8. Дайте определение массовой скорости выгорания – абсолютной, удельной и приведенной.
9. В чем заключается отличие удельной горючей от удельной пожарной нагрузки?

## 2. Пожары газовых фонтанов

---

### 2.1. Виды фонтанов

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

Пожары фонтанов на месторождениях классифицируют по трем признакам: составу, способу выброса, по дебиту. По составу фонтаны условно делят на *газовые*, *газонефтяные* и *нефтяные*. Фонтан считается газовым, если содержание газа в нем составляет не менее 95 %. К газонефтяным относят фонтаны, содержащие более 50 % газа и, соответственно, менее 50 % нефти, к нефтяным – фонтаны с содержанием нефти более 50 %. Состав фонтана можно определить по цвету пламени. Факел газового фонтана имеет цвет от светло-голубого до светло-желтого; газонефтяного – от светло-красного до темно-красного. Горение газонефтяного фонтана может сопровождаться клубами черного дыма. При пожарах нефтяных фонтанов во время истечения в воздухе успевает испариться и сгореть только незначительная часть нефти. Большая ее часть разливается и горит вокруг скважины. Пламя горячей струи нефти имеет темно-красный цвет и выделяет большое количество черного дыма.

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

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

Ликвидация мощных распыленных фонтанов представляет значительные трудности. Прежде чем заглушить скважину, на практике приходится выполнять очень большой объем подготовительных работ по растаскиванию поврежденной арматуры, удалению остатков устьевого оборудования и т. п. с тем, чтобы свести пожар к горению в компактном вертикальном факеле. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать именно компактные фонтаны (рис. 2.1).



## 2.2. Характеристики горения газовых фонтанов

Процесс горения факелов компактных газовых фонтанов является диффузионным. Скорость истечения газа из скважины зависит от отношения давления в пласте к давлению окружающей среды. Пластовое давление обычно в 2–20 раз превышает атмосферное давление. Поэтому скорость истечения газа на срезе сопла у подавляющего числа реальных газовых фонтанов больше скорости звука, число Рейнольдса при движении газового потока в атмосфере намного превышает критическое значение (2300) – пламя является турбулентным. В результате столь большого перепада давлений вблизи сопла формируется система волн расширения и сжатия газа – чередующихся скачков уплотнения. Визуально эти скачки уплотнения наблюдаются как своеобразные «бочки». Благодаря им происходит постепенное выравнивание давлений газа и окружающей среды. Скорость потока газа быстро убывает по мере удаления от среза трубы. На некотором расстоянии от устья скважины характер течения в струе ничем не отличается от дозвуковой турбулентной струи.

По характеру поля скоростей дозвуковая затопленная струя условно делится на три участка: начальный, переходный и основной (рис. 2.2).

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

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

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

Из теории горения известно, что в движущемся потоке газа пламя стабилизируется, если линейная скорость потока  $V_{л}$  равна нормальной скорости распространения пламени  $U$ . Если  $V_{л} \leq U$ , пламя соприкасается с усть-

ем скважины. Проскок пламени внутрь трубы в данном случае возможен, только если по трубе движется смесь газа с окислителем, состав которой попадает в область воспламенения. Такая ситуация реализуется, например, при разгерметизации технологического аппарата, в котором обращается горючая газообразная смесь, и сопровождается взрывом аппарата. Если  $V_{\text{л}} > U$ , происходит срыв пламени и зажигание струи газа становится невозможным при любой концентрации горючего.

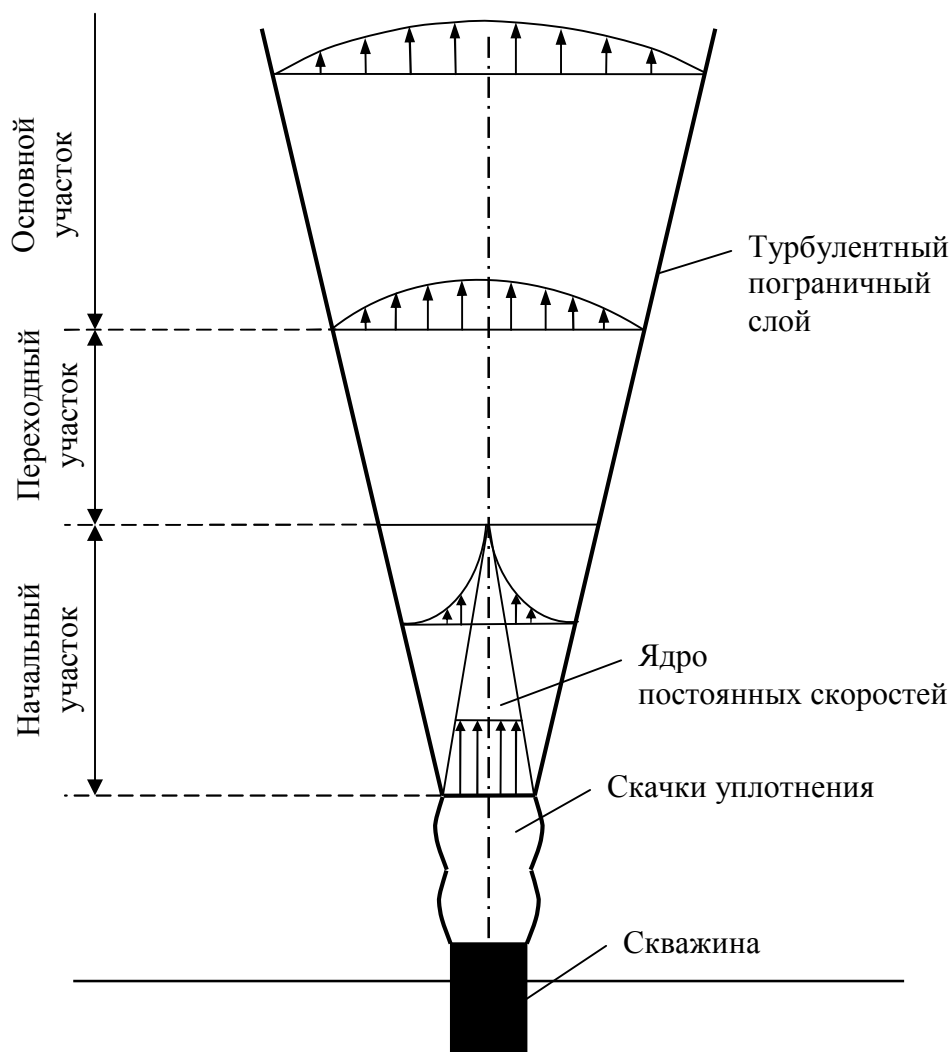


Рис. 2.2. Поле скоростей в струе газового фонтана

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



с увеличением расхода газа.

Подобно полю скоростей изменяется поле концентраций газа в струе. Известно, что горение возможно только в области концентраций, ограниченной нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени. На участке сверхзвукового истечения пограничный слой не образуется, перемешивание газа с воздухом практически не происходит, концентрация газа по всему сечению струи равна 100 %. По мере торможения потока концентрация воздуха в струе возрастает, а газа, наоборот, – уменьшается. Таким образом, в поперечном сечении струи концентрация газа уменьшается от максимального значения на оси потока до нуля на его границе. В структуре факела газового фонтана можно выделить три характерные поверхности равных концентраций, соответствующих нижнему концентрационному пределу, стехиометрической смеси и верхнему концентрационному пределу (рис. 2.3).

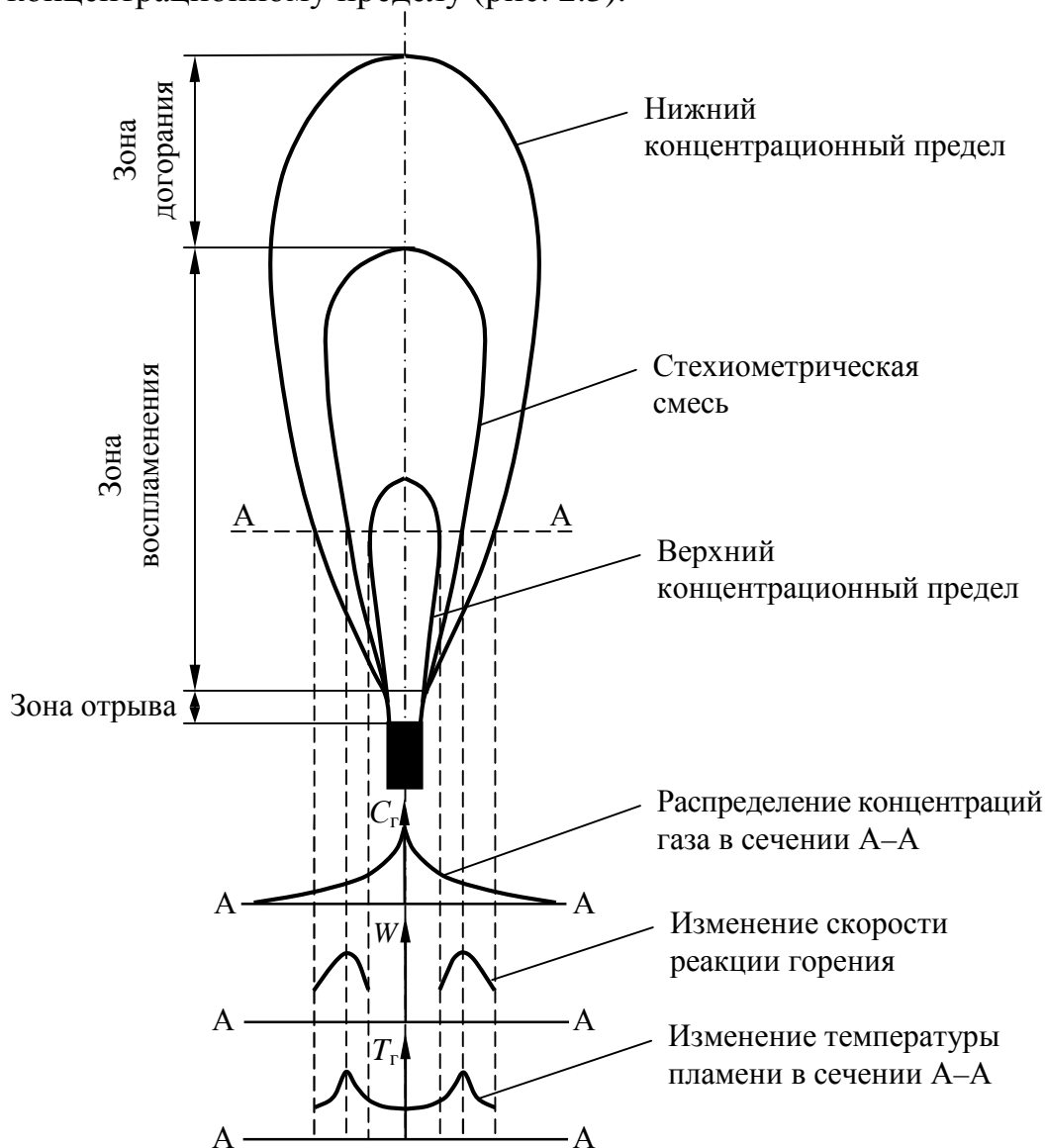


Рис. 2.3. Структура факела газового фонтана:  
 $W$  – скорость химической реакции;  $C_T$  – концентрация газа в струе;  
 $T_T$  – температура горения

Реакция горения имеет максимальную скорость на поверхности кон- тура стехиометрических концентраций горючего. На этой же поверхности наблюдаются максимальные значения турбулентной скорости распростра- нения и температуры пламени. Скорость реакции горения предельных сме- сей (при концентрации горючего газа равной нижнему или верхнему пре- делу) меньше, чем стехиометрических. Соответственно скорость распро- странения и температура пламени ниже (см. рис. 2.3). Таким образом, воспламенение турбулентной струи происходит по периферии потока в коль- цевой области, где турбулентная скорость распространения пламени имеет максимальное значение.

По мере удаления от среза трубы зона максимальных температур сужа- ется и на некотором расстоянии достигает оси потока. Этот участок факела от зоны отрыва до смыкания кольцевой области максимальных температур и скоростей распространения пламени называется *зоной воспламенения* (см. рис. 2.3). Процесс образования горючей смеси и ее воспламенение здесь в основном осуществляется вследствие турбулентного перемешивания газа и воздуха. Температура в этой зоне составляет порядка 1 000 °С.

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

Максимальная температура факела зависит главным образом от состава газа. При горении фонтанов природного газа, которые содержат до 95 % метана, максимальная температура в зоне догорания достигает примерно 1 350 °С. Наименьшая температура факела наблюдается в *зоне отрыва*. Средняя температура для этой зоны составляет около 50 °С. Вокруг устья скважины существует небольшая зона низких температур. Однако выпол- нение каких-либо работ в этой зоне чрезвычайно затруднено. Уровень зву- кового давления здесь достигает 130 дБ, что превышает болевой порог для человека (110 дБ).

## 2.3. Параметры газовых фонтанов. Оценка их значений

Основным параметром газовых фонтанов является *дебит* – расход, выраженный в миллионах кубометров газа в сутки. По этому параметру газовые фонтаны делят на: слабые – с дебитом от 0,5 до 3 млн м<sup>3</sup>/сут, средние – 3–5 млн м<sup>3</sup>/сут, мощные – 5–10 млн м<sup>3</sup>/сут и сверхмощные – более 10 млн м<sup>3</sup>/сут. Методика оценки дебита газового фонтана по высоте факела  $H_{\phi}$ , м, а также безопасного расстояния изложена в учебном пособии [1]. Она заключается в следующем.

Имеется экспериментальная зависимость высоты факела газового фонтана от дебита  $D$ :

$$H_{\phi} = 23D^{0,4}. \quad (2.1)$$

Для выполнения практических расчетов эту формулу можно упростить:

$$H_{\phi} \approx 20D^{0,5}. \quad (2.2)$$

Отсюда

$$D \approx 0,0025H_{\phi}^2. \quad (2.3)$$

Точность оценки дебита газового фонтана по этой формуле составляет 5 %, что для практики является вполне достаточным.

Существуют и другие методы оценки дебита фонтана природного газа, в частности, по величине давления в пласте. Расчетная формула имеет вид:

$$Q_0 = 0,457 \frac{d_b^2 P_0}{\sqrt{\Delta T_r}}, \quad (2.4)$$

где  $Q_0$  – расход газа, приведенный к нормальным условиям (давление 0,1 МПа, температура 20 °С), нм<sup>3</sup>/с;

$d_b$  – внутренний диаметр трубы, м;

$P_0$  – пластовое давление, Па;

$\Delta$  – относительная плотность газа по воздуху;

$T_r$  – температура газа, К.

Если давление в пласте неизвестно, его находят по расстоянию от устья трубы до первого скачка уплотнения, которое измеряют фотометрическим методом.

Определить дебит горящего фонтана можно также по уровню звукового давления. Его измеряют с помощью шумомеров, установленных на расстоянии 40–60 м от устья скважины.

Работы по ликвидации горящих газовых фонтанов представляют большие трудности главным образом из-за высокой интенсивности теплового излучения. Границу зоны теплового воздействия в данном случае устанавливают по величине безопасной плотности теплового потока  $q_{\text{доп}}$ , которую человек без специальной защиты выдерживает неограниченное время. Для расчета безопасного расстояния от горячей скважины принимают, что все излуче-

ние факела сконцентрировано в точке, расположенной в геометрическом центре факела, т. е. эта точка находится на оси потока и расстояние от нее до устья скважины равно половине высоты факела.

Интенсивность излучения  $q_{л}$ , исходящего из этой точки в окружающее пространство, определяется величиной лучистой составляющей общих потерь тепла из зоны горения – коэффициентом излучения факела пламени  $f$ :

$$f = q_{л} / (Q_{н}g), \quad (2.5)$$

где  $q_{л}$  – интенсивность излучения факела, кВт;

$Q_{н}$  – низшая теплота сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;

$g$  – секундный расход газа, м<sup>3</sup>/с.

Тогда плотность потока излучения  $W$  через сферу радиусом  $R$  равна:

$$W = \frac{q_{л}}{4\pi R^2} = \frac{fQ_{н}g}{4\pi R^2}. \quad (2.6)$$

Расстояние  $R$ , на котором плотность лучистого теплового потока равна  $q_{доп}$  (т. е.  $W = q_{доп}$ ), является безопасным и определяется выражением

$$R_{без} = \sqrt{\frac{fQ_{н}g}{4\pi q_{доп}}}. \quad (2.7)$$

Очевидно, что на уровне земли безопасное расстояние от скважины  $L_{без}$  (рис. 2.4) равно:

$$L_{без} = \sqrt{R_{без}^2 - (0,5H_{ф} + H_{т})^2}, \quad (2.8)$$

где  $H_{т}$  – высота трубы, м.

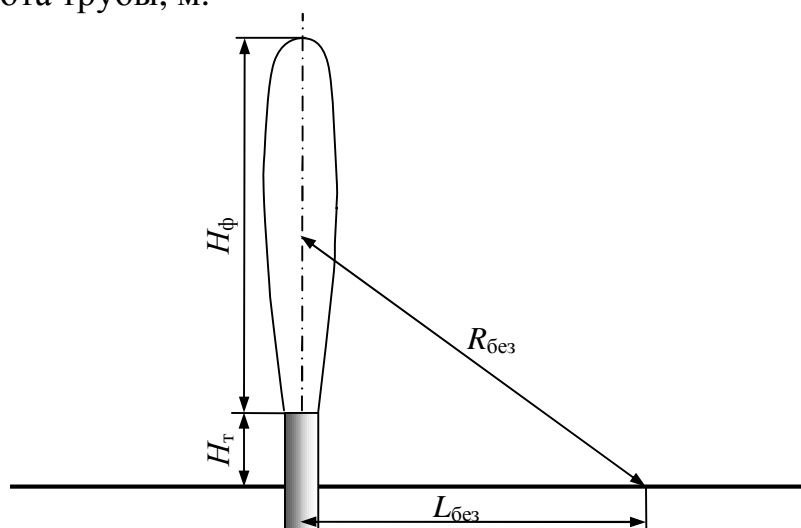


Рис. 2.4. Схема расчета безопасного расстояния до факела газового фонтана

Значение коэффициента излучения  $f$  для углеводородов можно найти по эмпирической формуле

$$f = 0,048\sqrt{M}, \quad (2.9)$$

где  $M$  – молярная масса углеводорода.

Для практических целей можно считать:

$$f \approx 0,05\sqrt{M}. \quad (2.10)$$

Среднюю молярную массу горючих компонентов смеси газов можно определить по следующему выражению:

$$M = \sum M_i a_i, \quad (2.11)$$

где  $M_i$  – молярная масса  $i$ -го компонента смеси;

$a_i$  – доля  $i$ -го компонента в смеси.

Низшая теплота сгорания смеси газов равна:

$$Q_n = \sum Q_{ni} a_i, \quad (2.12)$$

где  $Q_{ni}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего компонента;

$a_i$  – объемная доля  $i$ -го горючего компонента.

Методики расчета низшей теплоты сгорания и температуры пламени изложены в учебном пособии [2].

Расчетные значения плотности лучистого теплового потока, полученные по описанной методике, хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 2.1). Значения  $W$ , приведенные в табл. 2.1, получены для газового фонтана, состоящего из метана, дебитом 0,936 млн м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 2.1

**Расчетные значения плотности лучевого потока**

Расстояние до устья скважины $L$ , м	Плотность лучистого теплового потока $W$ , кВт/м <sup>2</sup> ,	
	расчетная	экспериментальная
10	74,0	84,0
20	32,2	28,0
30	16,7	14,0
40	9,9	10,5
50	6,5	7,0

Результаты расчетов и экспериментов показывают, что интенсивность излучения возрастает при увеличении расхода газа и диаметра устья скважины. Излучение в различных направлениях зависит от скорости ветра. С наветренной стороны интенсивность излучения значительно уменьшается даже при слабом ветре (порядка 3–4 м/с). Интенсивность излучения резко снижается также при введении в струю фонтана воды. На рис. 2.5 показаны экспериментальные значения интенсивности излучения в зависимости от расстояния при различных расходах газа для скважины диаметром 150 мм.

Допустимая плотность теплового потока  $q_{\text{доп}}$ , при которой личный состав может работать длительное время в боевой одежде без специальных

средств тепловой защиты, принимается равной  $4,2 \text{ кВт/м}^2$ . Боевая работа в специальном теплозащитном снаряжении под защитой распыленных водяных струй считается возможной при плотности теплового потока  $14 \text{ кВт/м}^2$  не более 5 мин.

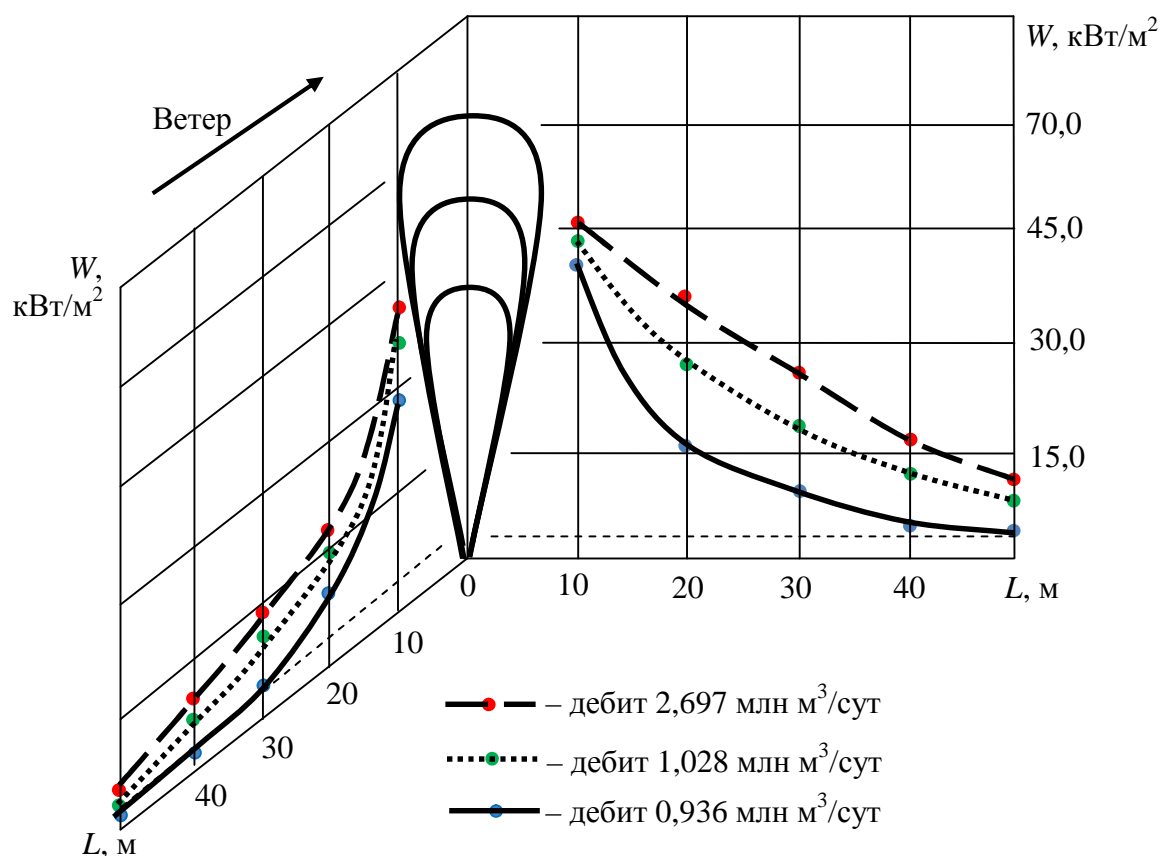


Рис. 2.5. Плотность теплового потока на различных расстояниях от скважины диаметром 150 мм

Широко распространено мнение, что при ликвидации пожаров фонтанов самое сложное – прекратить горение. В нашей стране разработаны и применяются технические средства, позволяющие потушить мощный фонтан в считанные минуты или секунды. Автомобили газовой тушения АГВТ-100, АГВТ-200 способны прекратить горение компактных газовых фонтанов дебитом до 5 млн  $\text{м}^3/\text{сут}$ . Практический предел возможностей импульсных порошковых пламеподавителей ППП-200, разработанных кафедрой «Процессы горения» Высшей инженерной пожарно-технической школы, не установлен до сих пор. Компактный газовый фонтан дебитом 8 млн  $\text{м}^3/\text{сут}$  был потушен залпом из двух ППП-200 за 2 с.

Однако преждевременное тушение факела может привести к сильному загрязнению окружающей среды продуктами выброса: нефтью, газом, высокоминерализованной водой. Поэтому к прекращению горения факела

приступают после того, как выполнены все мероприятия, необходимые для глушения скважины: фонтан приведен к компактному виду, доставлено и подготовлено запорное оборудование и т. д. Все это время производится охлаждение оборудования и орошение водой работающих в опасной зоне людей.



Рис. 2.6. Распыленный газовый фонтан

### Контрольные вопросы

1. Как классифицируются газовые фонтаны?
2. Чем характеризуются основные участки факела газового фонтана?
3. В чем заключается структура факела газового фонтана?
4. Что собой представляет поле концентраций газа в струе газового фонтана?
5. Назовите основные параметры пожара газового фонтана.
6. Что такое дебит газового фонтана, к чему приводит увеличение дебита газового фонтана?
7. К каким последствиям приводит увеличение высоты факела газового фонтана?
8. Где наибольшая температура газового фонтана?
9. Как влияет интенсивность излучения факела газового фонтана на безопасное расстояние?

## 3. Пожары резервуаров

### 3.1. Возникновение и развитие пожара на резервуаре

Проблема обеспечения пожарной безопасности резервуаров с горючими жидкостями в России возникла с момента пуска в эксплуатацию первого вертикального металлического резервуара для хранения нефти в 1878 году. Резервуары для горючих жидкостей, особенно нефти и нефтепродуктов, относятся к промышленным сооружениям повышенной пожарной опасности. Как правило, пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами являются сложными, ликвидируются с большим трудом и наносят не только материальный, но и большой экологический ущерб.

В настоящее время многие процессы и явления, связанные с возникновением и развитием пожаров на резервуарах, могут быть объяснены и спрогнозированы на основании имеющихся научных представлений.

Как известно, пожар возникает, когда во времени и пространстве совпадают три фактора: горючее вещество, окислитель и источник зажигания, т. е. появляется «треугольник горения». Вероятность и место возникновения такой ситуации определяется конструкцией резервуара, свойствами находящейся в нем жидкости, характером выполняемой технологической операции, климатическими условиями.

В настоящее время для хранения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей применяются в основном резервуары следующих типов: со стационарной крышей и свободной поверхностью жидкости, со стационарной крышей и понтоном, с плавающей крышей (рис. 3.1).

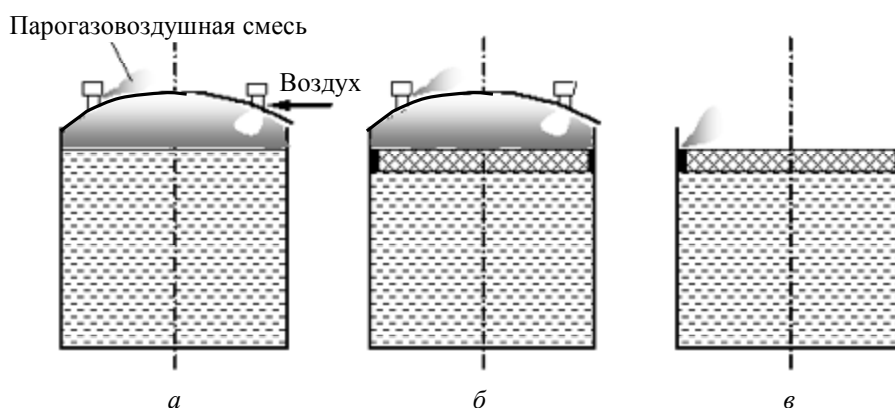


Рис. 3.1. Резервуары:

*а* – со стационарной крышей; *б* – с понтоном; *в* – с плавающей крышей



При эксплуатации резервуара, имеющего стационарную крышу, горючая газовая среда может образовываться как внутри его, так и снаружи.

При свободной поверхности жидкость интенсивно испаряется. Концентрация паров внутри таких резервуаров быстро достигает равновесных значений, которые определяются температурой жидкости. Технологическая температура жидкости, как правило, значительно выше верхнего температурного предела распространения пламени. Соответственно концентрация пара в парогазовом пространстве таких резервуаров обычно превышает верхний концентрационный предел, т. е. газовая среда внутри резервуара является негорючей. Во время откачивания жидкости внутрь резервуара поступает воздух, смесь разбавляется и попадает в область воспламенения. В такой ситуации пожар, как правило, начинается со взрыва паровоздушной смеси, частичного или полного отрыва крыши и воспламенения жидкости на всей свободной поверхности. Если смесь находится вблизи нижнего или верхнего концентрационного предела, то давление взрыва, как правило, оказывается достаточным лишь для частичного отрыва крыши в местах ее крепления к верхнему поясу резервуара. В этих случаях вначале воспламеняются пары, выходящие в местах отрыва крыши. Затем происходит деформация и обрушение крыши внутрь резервуара, горение распространяется на всю свободную поверхность жидкости.

При наполнении резервуара, а также при «малых дыханиях» пары стравливаются в атмосферу через дыхательные клапаны, разбавляются воздухом и образуют горючую смесь, т. е. вокруг резервуара формируется взрывоопасная зона. По мере удаления от места истечения (выброса) паров их концентрация уменьшается. На внешней границе зоны она равна нижнему концентрационному пределу распространения пламени.

Наибольшую протяженность взрывоопасная зона имеет при наполнении резервуара. В этом случае ее размеры при прочих равных условиях определяются производительностью операции и текущим содержанием горючих паров в парогазовом пространстве резервуара. Расчет по стандартной методике показывает, что в сухую безветренную погоду внешняя граница взрывоопасной загазованной зоны может выходить за пределы резервуарного парка. Чем больше протяженность взрывоопасной зоны, тем выше вероятность воздействия случайного источника зажигания (разряд атмосферного электричества, капли расплавленного металла, электрические или фрикционные искры и т. д.) и, соответственно, взрыва, пожара.

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

Наличие в резервуаре понтона на поверхности жидкости препятствует ее испарению. Однако возможность образования горючей смеси внутри резервуара при этом все равно сохраняется. Во время откачивания жидкости происходит ее испарение со стенок резервуара, и в надпонтонном пространстве постепенно накапливаются ее пары. Концентрация паров возрастает медленно, так как при каждом откачивании в резервуар поступает воздух. Поэтому парогазовое пространство в резервуаре с понтоном длительное время находится во взрывоопасном состоянии. При появлении источника зажигания воспламеняется чаще всего обедненная горючая смесь, близкая к нижнему концентрационному пределу распространения пламени.

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

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

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

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

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

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

Развитие пожара по стадиям на этих уровнях можно проследить по «Типовой схеме анализа вероятных сценариев развития пожара при хранении больших масс нефти и нефтепродуктов».

Снаружи резервуара при малых и больших «дыханиях» образуется взрывоопасная концентрация (рис. 3.2). С появлением источника зажигания возникает пожар на дыхательных клапанах. При этом в зависимости от величины концентрации паровоздушной среды внутри резервуара возможны следующие ситуации:

- а) устойчивое факельное горение;
- б) взрыв паровоздушной среды в резервуаре.

Переход от устойчивого факельного горения к горению на поверхности жидкости характерен для резервуара со сферической крышей. Взрыв резервуара, как правило, приводит к подрыву, реже срыву крыши с последующим пожаром резервуара.

Не исключена опасность, что взрыв паровоздушной смеси в резервуаре или затяжной пожар в нем может привести к его разрушению с последующим образованием гидродинамической волны, способной разрушить соседние резервуары, при этом площадь разлива нефтепродукта резко возрастает. Длительное горение определенных продуктов в резервуаре может привести к вскипанию и выбросу с последующим разливом продукта и горением в жидкой фазе на большой площади. Подобные явления, в свою очередь, вовлекают в пожар смежные резервуары и другие объекты.

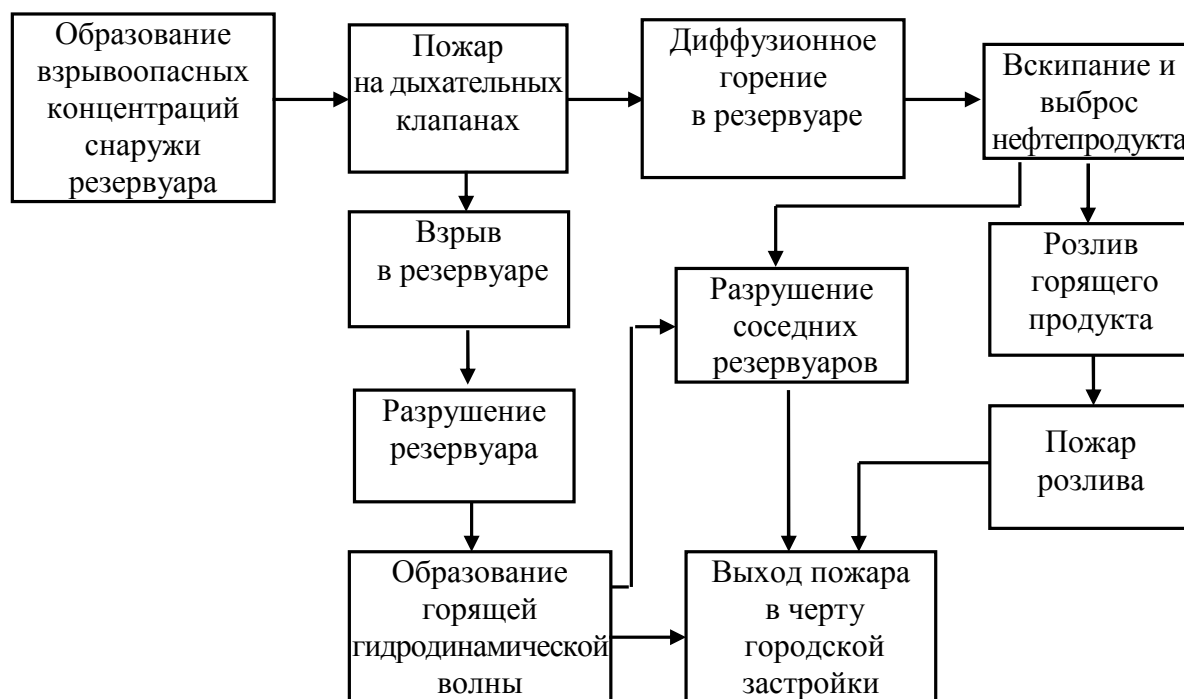


Рис. 3.2. Схема развития пожара № 1



Рис. 3.3. Схема развития пожара № 2

Развитие пожара, которое начинается с образования взрывоопасных концентраций в резервуаре (рис. 3.3), как правило, приводит к наиболее часто встречающемуся на практике варианту «пожар резервуара» или к разрушению резервуара при взрыве. Характер дальнейшего развития пожара (схема № 2) может быть аналогичен схеме № 1, начиная с разрушения резервуара или вскипания и выброса нефтепродукта.

В результате нарушения технологического режима или неисправности контрольно-измерительных приборов возможен неконтролируемый выход продукта из резервуара. Происходит розлив продукта. В зависимости от количества и свойств разлившегося нефтепродукта, структуры почвы можно ожидать следующие варианты развития пожара:

- а) загазованность территории и взрыв парогазовой фазы;
- б) пожар на месте разлива продукта; пожары в черте городской застройки вследствие попадания нефтепродукта в систему городской канализации.

При взрыве парогазовой фазы пожар может перескочить на второй уровень. При этом можно ожидать пожары на соседних зданиях и сооружениях, взрывы в соседних резервуарах. Горение в жидкой фазе при разливе приводит к быстрому нагреву оборудования и конструкции резервуара. И дальнейшее развитие пожара, возможно, будет происходить по схеме № 1.

Приведенные сценарии используются при составлении планов тушения, расчетов рисков и планировании боевых действий гарнизонов пожарной охраны.

## 3.2. Параметры пожара резервуара

Рассмотрим горение жидкости в промышленном резервуаре (то есть диаметром не менее 3–5 м) для случая, когда части конструкции резервуара, ограничивающие приток воздуха в зону горения (крыша, понтон), отсутствуют. Наиболее полно горение жидкостей в резервуарах исследовано в фундаментальной работе В. И. Блинова и В. Н. Худякова «Диффузионное горение жидкостей», опубликованной в 1961 году [4].

Основными параметрами пожара резервуара являются *скорость выгорания жидкости, интенсивность излучения, высота и температура пламени*. Все они взаимосвязаны. Так, скорость выгорания определяет высоту и форму пламени, интенсивность излучения из зоны горения в окружающую среду. Чем больше потери тепла излучением, тем ниже температура и, соответственно, теплосодержание пламени. В свою очередь, от интенсивности излучения и размеров пламени зависит величина теплового потока, падающего на поверхность жидкости, соответственно и скорость ее испарения/выгорания.

От интенсивности излучения из зоны горения и размеров пламени зависит протяженность зоны теплового воздействия факела на окружающие объекты. Конвективные потоки при открытых пожарах оказывают крайне слабое воздействие на окружающие объекты. Их влияние может проявляться на уровне верхней кромки резервуара, если под действием ветра они оказываются направленными параллельно плоскости земли. Однако даже в этом случае их действие не является устойчивым.

Для жидкостей наряду с массовой скоростью выгорания часто используют и линейную  $u_{л}$  – расстояние, на которое опускается уровень жидкости в единицу времени. Обе скорости взаимосвязаны через плотность жидкости  $\rho$ :  $v_{м}^{уд} = u_{л} \rho$ , кг/(с·м<sup>2</sup>).

Так же как и в газовом фонтане, на резервуаре образуется и горит поток газопаровоздушной смеси. Горение в обоих случаях является диффузионным и турбулентным. Однако над резервуаром, в отличие от газового фонтана, факел пламени формируется восходящими конвективными потоками продуктов горения. Скорость его истечения несоизмеримо меньше, чем у газового факела, и зависит от свойств горючего, а также от ряда внешних факторов. В свободно восходящей конвективной струе продуктов горения критическое значение числа Рейнольдса составляет 150, что примерно в 10 раз меньше обычно принятого. Чем больше масса вещества, испаряющегося и сгорающего в единицу времени, тем выше скорость восходящего потока, тем сильнее он турбулизован. Вместе с тем турбулизация потока пара создает лучшие условия для образования и сгорания горючей смеси.

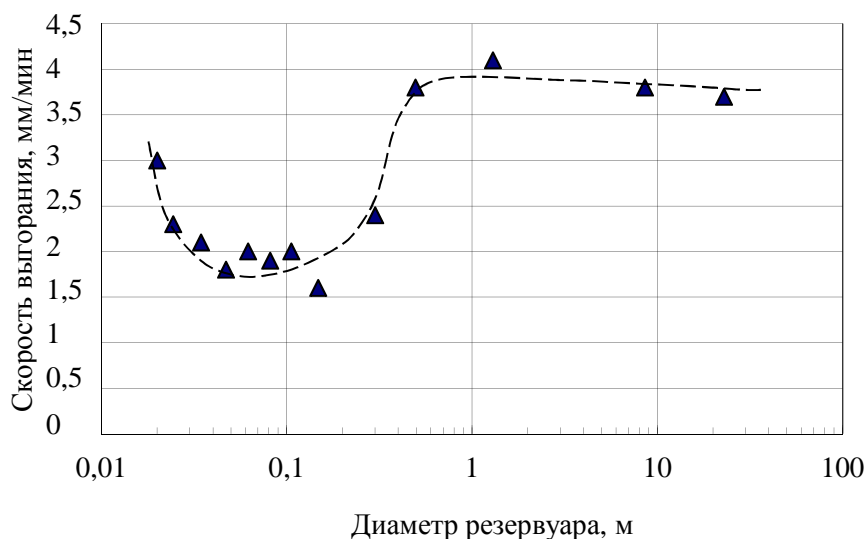


Рис. 3.4. Влияние диаметра резервуара на скорость выгорания бензина

Режим горения зависит от диаметра резервуара. В горелках диаметром менее 0,03 м пламена жидкостей ламинарные, с увеличением диаметра скорость выгорания уменьшается, как это видно на примере бензина (рис. 3.4) [4]. В диапазоне от 0,03 до 1 м наблюдается переходный режим от ламинарного к турбулентному. При горении в резервуарах диаметром более 1 м пламена полностью турбулентные, и скорость выгорания жидкости практически не зависит от диаметра.

В свою очередь, скорость выгорания определяется соотношением летучести жидкости и относительной излучательной способности. Светимость пламени обусловлена присутствием частиц углерода в продуктах горения. Излучение сажи увеличивает теплоотдачу пламени в окружающую среду. Соответственно, и большая часть энергии тратится на испарение жидкости.

Например, при горении в резервуаре диаметром 0,3 м первая фракция нефти (самая легкая) – бензиновая имеет относительную излучательную способность  $0,59 \div 0,72$ , керосин – 0,37, моторный бензин – 0,36. Пламя метанола практически невидимо. Относительная излучательная способность метанола – 0,07. При этом тепловой поток, падающий на поверхность зеркала жидкости от пламени  $q_{\text{пад}}$ , у бензина и керосина больше, чем требуется для поддержания стационарного горения  $q_{\text{треб}}$ , а у метанола – значительно меньше [5]:

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

В результате этого процесс горения нефти и большинства нефтепродуктов в резервуарах не является устойчивым (рис. 3.5).

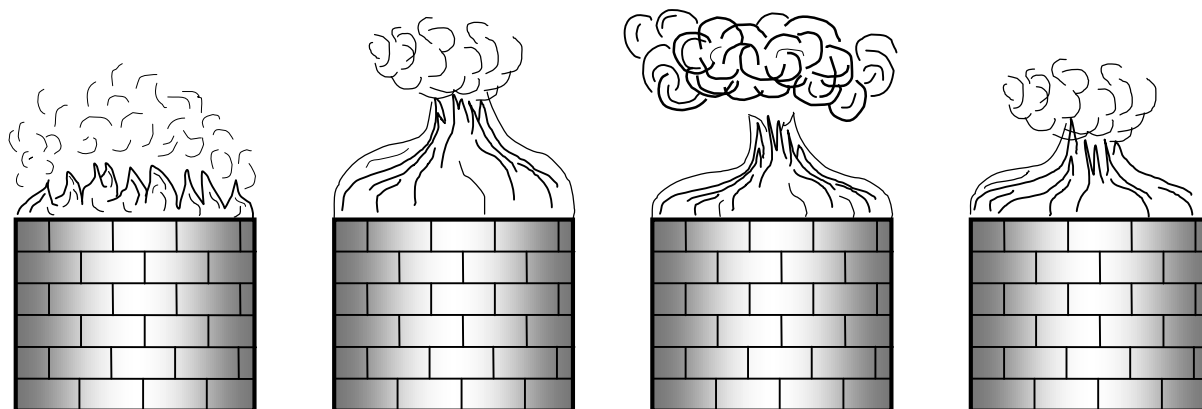


Рис. 3.5. Изменение высоты пламени при горении нефтепродуктов

За счет разности этих тепловых потоков над зеркалом жидкости накапливаются пары несгоревшего горючего, соответственно пламя вытягивается. Постепенно в зоне горения формируется облако, которое всплывает вверх, перемешивается с воздухом и сгорает за пределами основного факела пламени. После этого высота пламени уменьшается, и процесс повторяется (см. рис. 3.5).

Пламя спиртов является мерцающим. В этом случае недостаток лучистой энергии компенсируется конвективными тепловыми потоками, которые периодически достигают поверхности жидкости, вызывая ее испарение и сгорание (рис. 3.6).

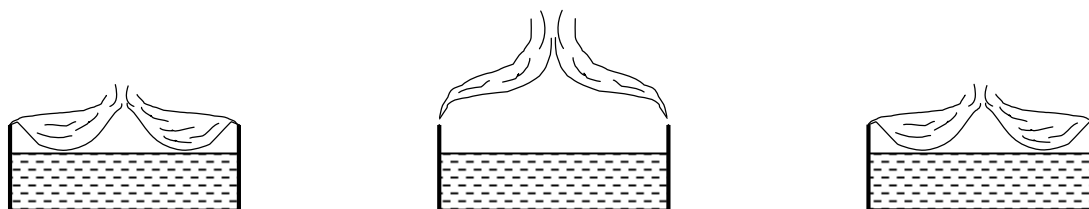


Рис. 3.6. Изменение формы пламени при горении спирта

Теплота, выделяющаяся в окружающую среду в виде лучистой энергии, поглощается более холодными зонами пламени и близлежащими слоями окружающей среды. Чем дальше от зоны горения, тем меньше плотность падающего теплового потока. Так же как и при горении газового фонтана, протяженность зоны теплового воздействия пожара резервуара зависит от коэффициента излучения  $f = q_{\text{луч}} / q_{\text{п}}$ . При этом коэффициент излучения зависит не только от вида горючего, но и от диаметра резервуара.

На рис. 3.7 приведены значения коэффициента излучения из зоны горения в окружающую среду для некоторых нефтепродуктов [6].

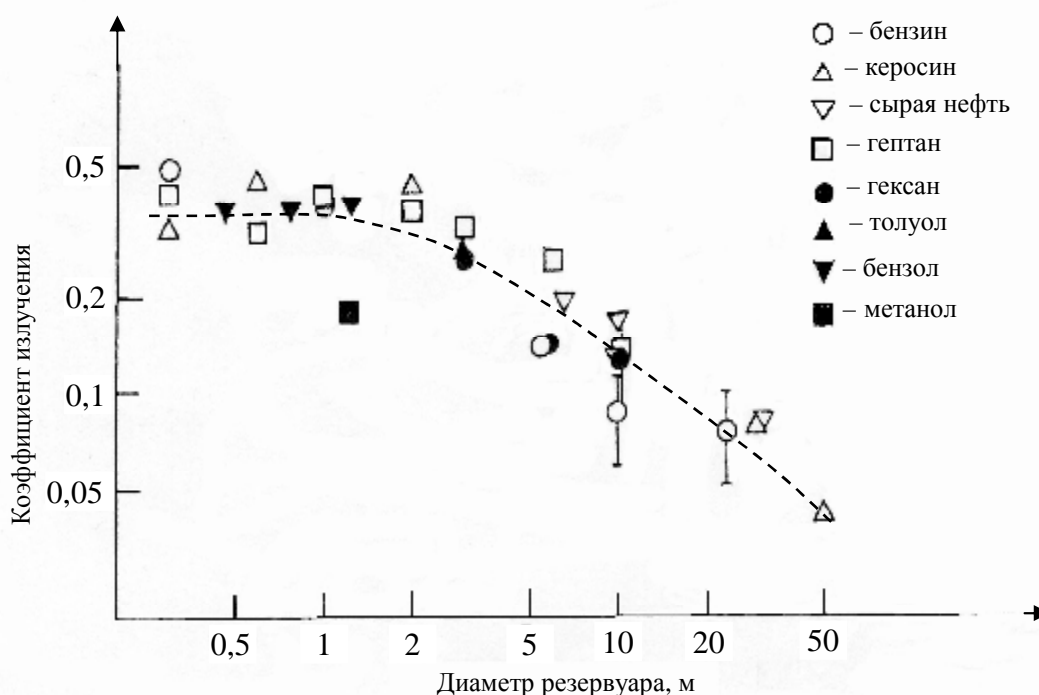


Рис. 3.7. Зависимость коэффициента излучения от диаметра резервуара

Интенсивность излучения  $q_{\text{луч}}$  во всех случаях измерялась на уровне борта резервуара на расстоянии  $L$ , равном  $5D$ . Как видно из этих данных, доля излучения составляет 30–50 % от теплоты пожара при горении углеводородов в резервуарах диаметром до 2 м. С увеличением диаметра резервуара коэффициент излучения снижается до 0,07 (диаметр 30 м) и 0,04 (диаметр 50 м) – при горении керосина. Доля излучения при горении метанола в резервуаре диаметром 1,25 м составляет около 0,17, что намного меньше, чем при горении углеводородов.

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

При горении жидкости на большой площади окислителя не хватает для образования горючей паровоздушной смеси над всей поверхностью одновременно. С увеличением диаметра резервуара высота пламени  $H$  уменьшается и для нефтепродуктов не превышает  $1-1,5D$ . При соотношении  $H/D < 1$



пламя разделяется на ряд небольших очагов. Эти очаги не зависят друг от друга, не являются устойчивыми. Они случайным образом возникают и исчезают на произвольных участках поверхности зеркала жидкости. В результате пламя имеет неоднородную температуру, и дым образуется не только на периферии, но и в объеме зоны горения. Интенсивное сажеобразование увеличивает поглощение излучения. Поэтому приборы, установленные за пределами больших резервуаров, регистрируют меньший тепловой поток.

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

В результате обработки опубликованных данных о пожарах резервуаров и разливов жидкостей было получено выражение [5]

$$H = 0,23 q_{\text{п}}^{2/5} - 1,02D, \text{ м.} \quad (3.1)$$

Следует иметь в виду, что значение  $H$ , получаемое по данной формуле, соответствует некой усредненной высоте, так как пламя над резервуаром непрерывно пульсирует по причинам рассмотренным выше.

Формула (3.1) учитывает массовую скорость выгорания и низшую теплоту сгорания жидкости, так как эти параметры определяют величину  $q_{\text{п}}$ . Если в резервуаре горит однокомпонентная (индивидуальная) жидкость, то скорость выгорания быстро достигает максимального значения, соответствующего температуре кипения, и в дальнейшем не изменяется. Низшая теплота сгорания в этом случае также остается постоянной. При горении многокомпонентных жидкостей (сложного состава) состав верхнего прогретого слоя изменяется, так как происходит разгонка смеси. Характерным примером таких жидкостей является нефть, которая состоит из фракций, кипящих в разных интервалах температур:

Бензиновая	40–180 °С
Лигроиновая	120–200 °С
Керосиновая	150–300 °С
Минеральные масла	> 350 °С

По мере улетучивания компонентов, имеющих более низкую температуру кипения, температура кипения прогретого слоя возрастает (рис. 3.8).

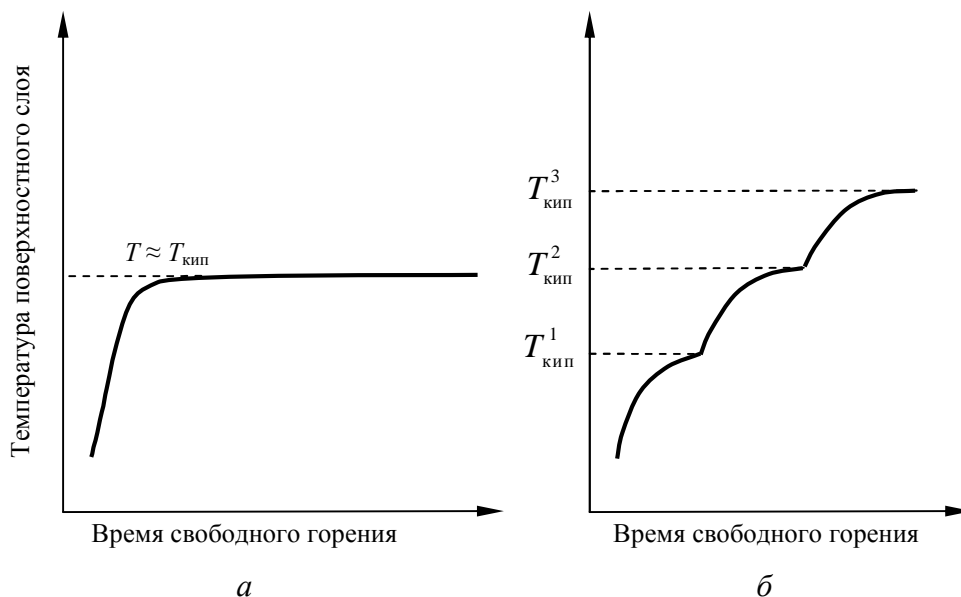


Рис. 3.8. Изменение температуры поверхностного слоя индивидуальной (а) и многокомпонентной жидкости (б) при горении:

$T_{\text{кип}}^1, T_{\text{кип}}^2, T_{\text{кип}}^3$  – максимальная температура кипения соответствующей фракции

Соответственно изменяются скорость выгорания и низшая теплота сгорания, что должно сказываться на высоте пламени.

### 3.3. Распределение температуры в жидкости по высоте резервуара

После воспламенения температура поверхностного слоя жидкости быстро повышается и достигает максимального значения. Следует отметить, что для однокомпонентных (индивидуальных) жидкостей это значение немного ниже температуры кипения, так как часть тепла, поступающего к поверхности жидкости, тратится на парообразование. Чем выше теплота парообразования, тем больше это различие.

Распределение температуры жидкости по глубине резервуара носит различный характер (рис. 3.9). В некоторых жидкостях по мере удаления от поверхности температура плавно понижается (рис. 3.9, а). В других – формируется слой, практически равномерно прогретый до температуры, близкой к температуре кипения (рис. 3.9, б). Этот слой называется *гомотермическим*. Он может образовываться как в индивидуальных, так и в поликомпонентных жидкостях (то есть в жидкостях сложного состава). Такие распределения температуры принято называть *распределением первого и второго рода* соответственно.

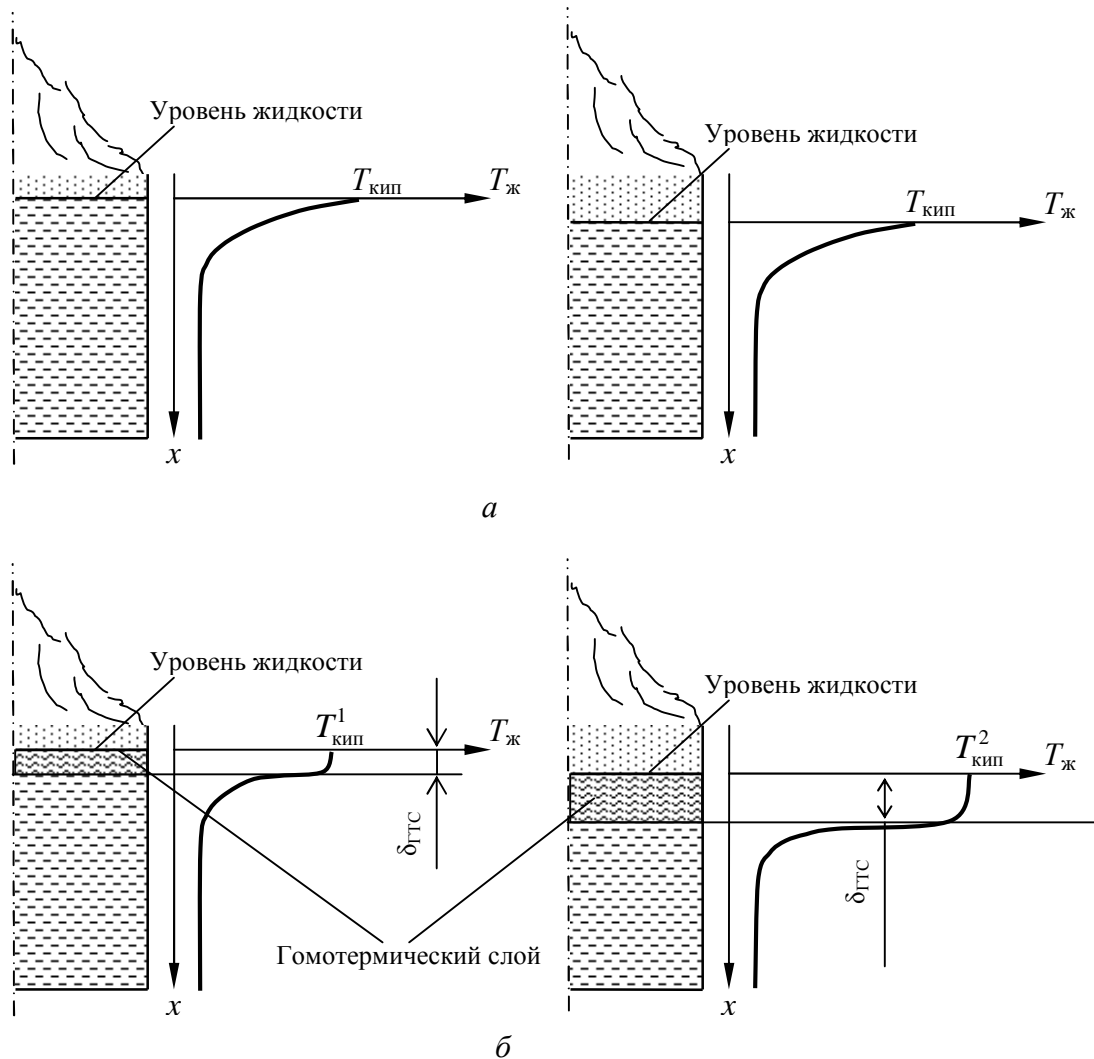


Рис. 3.9. Распределение температуры в жидкости, не образующей (а) и образующей (б) гомотермический слой:  
 $q_{ГТС}$  – толщина гомотермического слоя

В индивидуальных жидкостях, например в диэтиловом эфире, со временем растет толщина гомотермического слоя, а температура остается постоянной. В поликомпонентных жидкостях его температура повышается, как показано на рис. 3.8, б.

При возникновении гомотермического слоя жидкость как бы разделяется на два слоя. В верхнем нагретом слое с увеличением расстояния от поверхности жидкости температура понижается очень медленно. Разность температур на поверхности и на нижней границе гомотермического слоя очень мала. В нижнем слое температура быстро падает по мере удаления от нижней границы гомотермического слоя (см. рис. 3.9, б).

Природа гомотермического слоя до конца не ясна. Достоверно известно следующее.

В верхнем и нижнем слоях горячей жидкости действуют конвективные потоки. Причем в верхнем слое они значительно более интенсивные, чем в нижнем. В результате этого происходит перемешивание жидкости и выравнивание ее температуры по толщине слоя.

Гомотермический слой имеет предельную толщину, т. е. его нижняя граница может не достигать дна резервуара. Причем предельная толщина возрастает с увеличением диаметра резервуара.

Чем ниже теплопроводность стенок, тем медленнее растет толщина гомотермического слоя.

При охлаждении борта резервуара рост толщины гомотермического слоя замедляется, а в лабораторных условиях может прекратиться совсем.

Гомотермический слой значительной толщины возникает в жидкостях с температурой кипения (начала кипения жидкостей сложного состава) не более 100 °С.

На основании экспериментальных данных, как собственных, так и полученных другими исследователями, В. И. Блинов и В. Н. Худяков предположили, что в механизме образования и роста гомотермического слоя ведущую роль играет стенка резервуара.

Вначале, по истечении нескольких минут горения, температура стенки резервуара оказывается везде выше температуры жидкости (рис. 3.10). После того как стенка достаточно прогреется, на ней начинается кипение жидкости. Пузырьки пара поднимаются вверх и вызывают интенсивное движение в верхнем слое горячей жидкости. Эти потоки перемешивают соответствующий слой и выравнивают его температуру – происходит зарождение гомотермического слоя.

Нагретый слой жидкости ускоряет прогрев стенки, на соответствующей ее части начинается кипение, ведущее, в свою очередь, к росту толщины гомотермического слоя. Перемещение границы гомотермического слоя приводит к нагреванию следующей части стенки резервуара – процесс повторяется.

Было высказано также предположение, что в поликомпонентных жидкостях (в частности, в нефти) плотность гомотермического слоя выше, чем плотность исходной жидкости, из-за выгорания легких фракций [7].

В результате этого гомотермический слой как бы продавливается через жидкость, находящуюся ниже. Однако прямые измерения плотности нефти при горении в резервуаре показали, что это не так. Средняя плотность жидкости, находящейся в гомотермическом слое, ниже исходной.

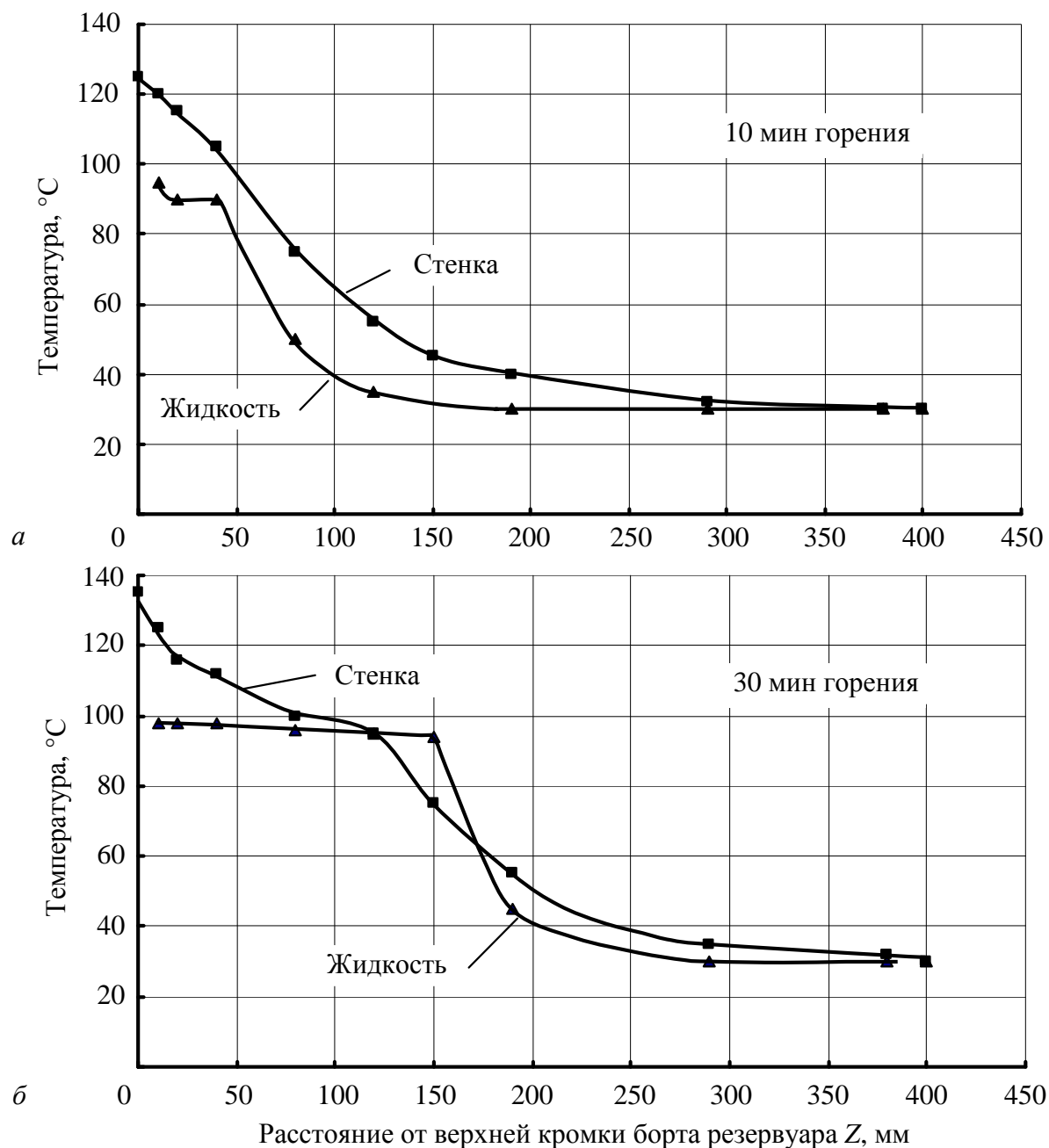


Рис. 3.10. Распределение температуры в бензине и на стенке резервуара через 10 мин (а) и 30 мин (б) горения

Вместе с тем совершенно очевидно, что плотность жидкости, из которой удаляются (выгорают) легкие фракции, должна возрастать. Поскольку в гомотермическом слое этого не происходит, можно предположить, что разгонка протекает в тонком поверхностном слое. Жидкость, обогащенная тяжелыми фракциями, оседает вниз и на нижней границе гомотермического слоя отдает избыточное тепло исходной жидкости, которая нагревается и всплывает к верхней границе гомотермического слоя. Возникающий противоток обеспечивает почти равномерное распределение плотности и

температуры во всем нагретом слое и постепенное увеличение его толщины. При этом, если скорость выгорания жидкости слишком велика, большое количество тепла уносится из поверхностного слоя при испарении. В результате теплосодержания отяжелевшей жидкости может быть недостаточно для прогрева нижних слоев. Тогда гомотермический слой в поликомпонентной жидкости может не образовываться, что и наблюдается в ряде случаев при горении бензина в резервуарах большого диаметра, когда влияние стенки ослаблено. Описанный механизм применим только к жидкостям сложного состава и не объясняет образование гомотермического слоя, например, в диэтиловом эфире, ацетоне.

Таким образом, в настоящее время не существует единого общепризнанного механизма формирования гомотермического слоя при горении жидкостей в резервуарах. Одни исследователи отдают предпочтение процессам кипения жидкости у нагретой стенки, другие – конвекции, возникающей за счет разности плотностей в верхнем слое. Очевидно, в реальности имеют место оба этих процесса. Влияние каждого из них на образование и рост гомотермического слоя, по-видимому, определяется природой жидкости и размерами резервуара.

### **3.4. Вскипание и выброс жидкости при горении в резервуаре**

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

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

Уже первые исследования этих явлений показали их связь с образованием гомотермического слоя. Было установлено, что вскипание нефти и высококипящих нефтепродуктов представляет собой вспенивание жидкости, которое происходит в результате вскипания капель воды диспергированных в массе вещества. Схема этого процесса показана на рис. 3.11.

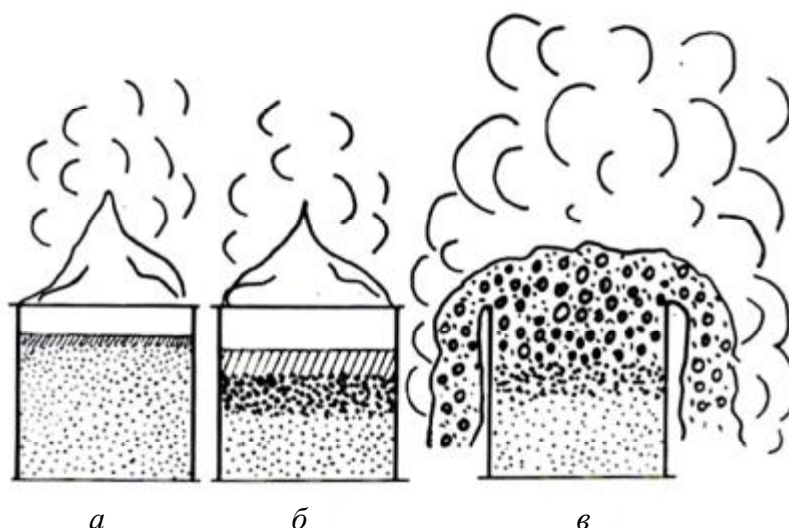


Рис. 3.11. Схема процесса вскипания жидкости при пожаре резервуара

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

Гомотермический слой, образующийся при возникновении горения (см. рис. 3.9, б), в силу более высокой температуры имеет меньшую вязкость, чем остальная масса жидкости. Присутствие воды увеличивает скорость опускания его нижней границы и в то же время замедляет рост температуры.

В результате этого капли воды, опускаясь вниз, концентрируются вблизи нижней границы гомотермического слоя (см. рис. 3.11, б). Когда температура гомотермического слоя достигает температуры кипения воды, капли превращаются в пар и вспенивают жидкость (см. рис. 3.11, в).

Вскипание может быть многократным. Его интенсивность зависит от длительности горения резервуара и степени обводненности нефтепродукта. При содержании влаги менее 0,3 % вскипание нефти обычно не происходит, а при 20 % и более вспенившаяся масса не горит. При влажности нефти 0,6 % первое вскипание наступает примерно через 50–60 мин, а при 0,9 % – через 40–50 мин.

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

Причиной выбросов при пожарах резервуаров с нефтепродуктами является вскипание воды, находящейся на дне резервуара, или раствора пенообразователя, скопившегося в результате разрушения пены, подаваемой на тушение (рис. 3.12).

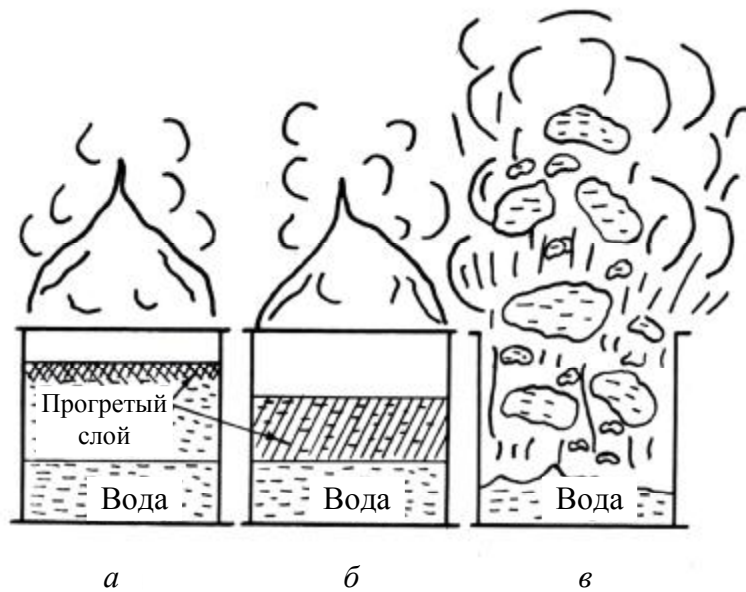


Рис. 3.12. Схема процесса выброса при горении нефтепродуктов в резервуарах

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

$$Q = \int_0^{z_0} c_v \rho (T - T_{\text{кип}}) S dz, \quad (3.2)$$

где  $Q$  – количество тепла, аккумулированное в перегретом слое воды;

$z_0$  – толщина слоя воды, в котором температура выше температуры кипения;

$c_v$ ,  $\rho$  и  $T_{\text{кип}}$  – теплоемкость, плотность и температура кипения воды соответственно;

$T$  – температура перегретого слоя воды на расстоянии  $z$  от поверхности;

$S$  – площадь зеркала жидкости.

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

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

Время от начала пожара до наступления выброса  $\tau_v$  оценивают по формуле [8]:

$$\tau_v = (H - h) / (u_n + u_{\text{ГТС}} + v), \quad (3.3)$$



где  $H$  – начальная высота слоя нефти в резервуаре, м;

$h$  – толщина слоя воды на дне резервуара, м;

$u_d$  – линейная скорость выгорания жидкости;

$u_{ГТС}$  – линейная скорость роста гомотермического слоя;

$v$  – линейная скорость откачки жидкости из резервуара.

В зависимости от выбранной единицы измерения линейных скоростей значение  $\tau_b$  будет измеряться в м/мин или м/ч. Их значения, рекомендуемые для расчета, приведены в таблице.

#### Линейная скорость выгорания некоторых жидкостей

Жидкость	Линейная скорость выгорания, м/ч	Линейная скорость роста гомотермического слоя, м/ч
Бензин	До 0,30	До 0,10
Смесь нефти и газового конденсата	До 0,20	До 0,40
Нефть	До 0,15	До 0,40
Мазут	До 0,10	До 0,30

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

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

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

Из всего изложенного следует, что вскипание и выброс могут происходить при горении в резервуарах не только нефти и нефтепродуктов. В общем случае для вскипания и выброса необходимо, чтобы в горячей жидкости или под ней находилась другая жидкость, которая нерастворима (или ограниченно растворима) в горячей и, кроме того, имеет меньшую температуру кипения.

## Контрольные вопросы

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

## 4. Открытые пожары твердых горючих материалов

### 4.1. Классификация твердых горючих материалов

*Твердыми* называются материалы, температура плавления или разложения которых превышает 50 °С, а также вещества, не имеющие температуры плавления (древесина и др.) (ГОСТ 12.1.044–89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов»).

ТГМ можно классифицировать по нескольким признакам:

- по химическому составу (рис. 4.1),
- по поведению при нагревании.

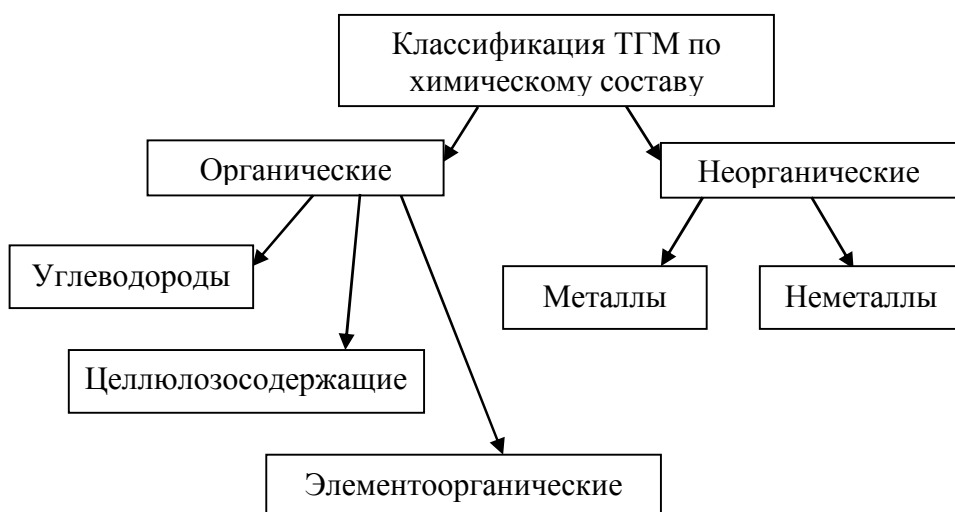


Рис. 4.1. Классификация ТГМ по химическому составу

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

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

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

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

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

ТГМ можно также классифицировать по поведению при нагревании (рис. 4.2):

- *безгазовые* (практически не переходящие в газообразное состояние);
- *газифицирующиеся* при нагревании.

подавляющее большинство конденсированных веществ относятся ко второму классу. При нагревании они газифицируются, после чего осуществляется гомогенное горение продуктов газификации.

В свою очередь, газифицирующиеся ТГМ делят на две большие группы, исходя из того, каким образом они переходят в парогазовое состояние. Твердые горючие вещества, которые переходят в газообразное состояние через жидкую фазу (в условиях повышенной температуры плавятся), принято называть *ТГМ первого рода*. Процесс воспламенения ТГМ первого рода повторяет процесс подготовки и воспламенения горючих жидкостей. Их горение протекает в гомогенном режиме.

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

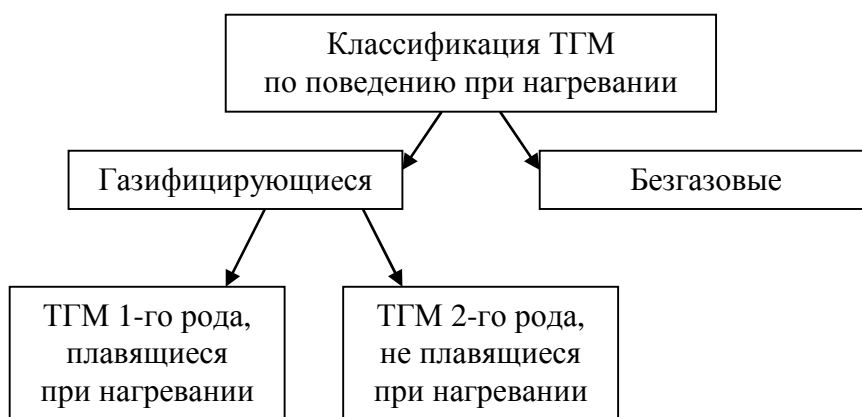


Рис. 4.2. Классификация ТГМ по поведению при нагревании

## 4.2. Общие закономерности воспламенения и горения твердых горючих материалов

Процессы возникновения и развития горения для твердых горючих материалов имеют много общего с процессами горения газов и жидкостей. Однако кроме общих черт существует и целый ряд особенностей, обусловленных агрегатным состоянием и различиями в строении.

Рассмотрим механизм воспламенения ТГМ. При контакте ТГМ с нагретым до высокой температуры источником зажигания возникает теплообмен, при этом с материалом происходят следующие процессы:

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

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

3. Образование горючей паровоздушной смеси и ее предварительный нагрев.

4. Самовоспламенение паровоздушной смеси с последующим горением.

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

На каждой стадии протекают специфические физико-химические процессы, которые определяют состояние системы.

В очаге горения ТГМ геометрически можно выделить несколько характерных зон (рис. 4.3):

- 1 – зона исходного материала;

- 2 – зона предварительного нагрева материала до температуры физико-химических превращений;

- 3 – зона фазового перехода, в которой происходит плавление или разложение материала;

- 4 – зона образования горючей смеси и ее нагрева до температуры воспламенения;

- 5 – зона фронта пламени, где выделяется основная часть тепловой энергии и наблюдается максимальная температура;

- 6 – зона продуктов горения, где продукты реакции смешиваются с холодным воздухом.

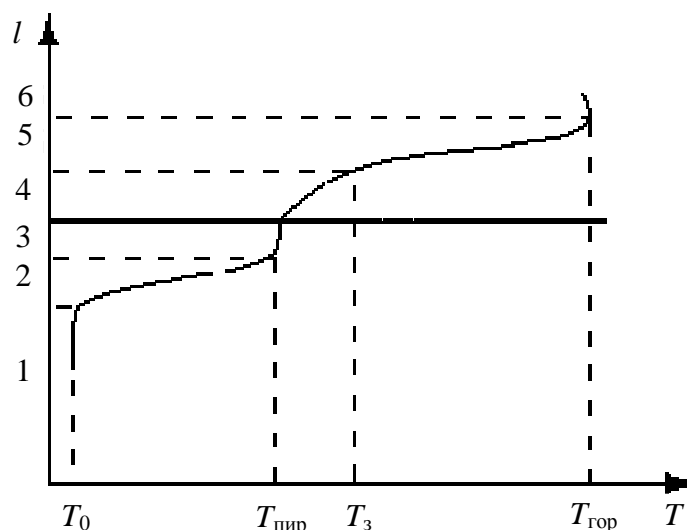


Рис. 4.3. Характерные температурные зоны при горении ТГМ:  
 $T_0$  – температура начальная;  $T_{\text{пир}}$  – температура пиролиза;  $T_з$  – температура зажигания;  
 $T_{\text{гор}}$  – температура горения

Таким образом, процесс горения большинства ТГМ начинается с го-могенного режима. Горение характеризуется высокой скоростью распро-странения, мощными конвективными потоками и излучением.

Время воспламенения ТГМ зависит от скорости образования над по-верхностью материала летучих компонентов в концентрации, превышаю-щей нижний КПП. Процесс образования летучих компонентов идет с за-тратами энергии, для материалов разного состава начинается при различ-ных температурах и протекает с разной интенсивностью. Способность материала сопротивляться нагреву без изменения химической структуры называется *термической стойкостью материала*.

### 4.3. Распространение пламени по поверхности твердых горючих материалов

После воспламенения ТГМ происходит перемещение фронта пла-мени по поверхности. Распространение горения протекает за счет передачи тепла от зоны горения к еще негорящим участкам материала. Передача тепла осуществляется за счет излучения, конвекции и теплопроводности. В зависимости от условий горения соотношение количеств тепла, посту-пающих с этими видами теплопередачи, может быть различным. Поэтому скорость распространения пламени по поверхности ТГМ зависит от усло-вий горения.

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

- природа материала, его физико-химические свойства (скорость образования летучих продуктов);
- влажность материала;
- ориентация образца материала в пространстве;
- скорость и направление воздушных потоков;
- начальная температура материала;
- геометрические размеры образца материала (толщина, дисперсность).

На обычных пожарах наиболее распространенным горением является горение материалов, основой которых является целлюлоза. Характерный пример материала такого рода – древесина.

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

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

*Целлюлоза* – клетчатка, главный строительный материал растительного мира, образующий клеточные стенки деревьев и других высших растений. Самая чистая природная форма целлюлозы – волоски семян хлопчатника.

Уже с 1913 года известна ее эмпирическая формула  $C_6H_{10}O_5$ , определенная по данным количественного анализа. Структурная формула представлена на рис. 4.4.

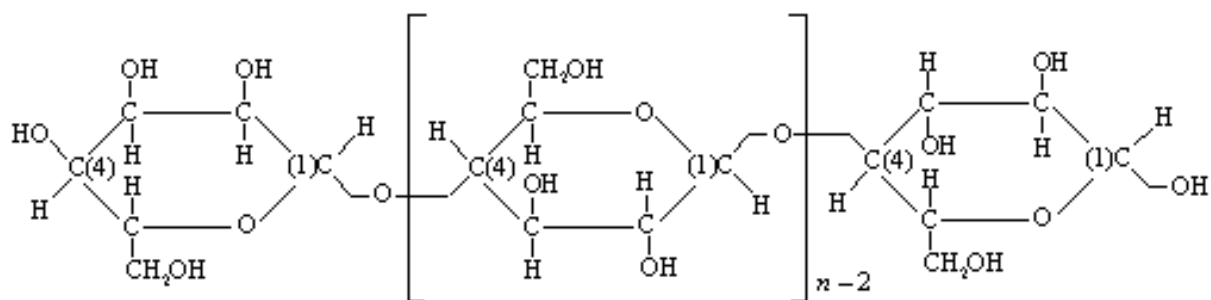


Рис. 4.4. Химическая структура целлюлозы

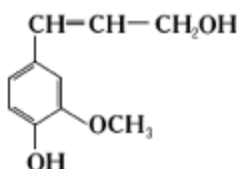


Рис. 4.5. Структура мономера лигнина

*Лигнин* (от лат. *lignum* – дерево) – сложный (сетчатый) ароматический природный полимер, входящий в состав наземных растений, продукт биосинтеза. После целлюлозы лигнин самый распространенный полимер на земле (рис. 4.5).

В химическом смысле лигнин – понятие условное и обобщающее. Как нет двух одинаковых людей, так и нет двух одинаковых лигнинов. Принято считать, что молекула лигнина состоит из атомов углерода, кислорода и водорода.

Лигнины, получаемые из разных растений, значительно отличаются друг от друга по химическому составу.

Молекула лигнина неопределенно велика и имеет много разнообразных функциональных групп. Она состоит из продуктов полимеризации ароматических спиртов; основной мономер – кониферилловый спирт.

Общей структурной единицей всех видов лигнина является фенилпропан ( $C_9H_{10}$ ), а различия связаны с разным содержанием функциональных групп.

*Гемицеллюлозы* – группа полисахаридов, в которую входят пентозаны ( $(C_5H_8O_4)_n$ ) и гексозаны ( $(C_6H_{10}O_5)_n$ ). Формула гексозанов на первый взгляд идентична формуле целлюлозы. Однако степень полимеризации у всех гемицеллюлоз гораздо меньше и составляет 60–200. Это свидетельствует о более коротких цепочках молекул и меньшей стойкости этих веществ по сравнению с целлюлозой.

Рассмотрим поведение древесины (как наиболее распространенного горючего материала) при нагревании.

Горение древесины существенным образом отличается от горения жидкостей и газов и может протекать сразу в двух режимах – *гомогенном* и *гетерогенном*. Поэтому при горении древесины можно выделить две фазы:

1) гомогенное (то есть пламенное) горение газообразных продуктов разложения;

2) гетерогенное горение образовавшегося твердого углеродистого остатка.

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



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

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

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

Но так как пламенное горение – это процесс, идущий только при доступе воздуха в зону горения, то и состав продуктов пиролиза в этом случае будет отличаться. В целом можно спрогнозировать обогащение зоны горения также и парами жидкофазных продуктов пиролиза, снижение содержания CO<sub>2</sub> за счет разбавления зоны горения воздухом, а также наличие газообразных продуктов пиролиза в концентрациях между нижним и верхним концентрационным пределом воспламенения.

Стадия пламенного горения занимает достаточно короткий промежуток времени, но при этом выделяется около 55–60 % всей энергии. Скорость же гетерогенного горения определяется скоростью поступления воздуха к поверхности. Часто гетерогенное горение называют *тлением*.

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

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

## 4.4. Горение пылей

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

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

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

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

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

Рассмотрим особенности горения аэрозоля и аэрогеля.

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

В целом горение пыли в осевшем состоянии во многом напоминает горение твердого горючего материала, из которого эта пыль получена. Отличительной особенностью аэрогеля является его *способность переходить во взвешенное состояние*. При нагревании протекают все подготовительные процессы, характерные для твердых горючих материалов, однако скорость их протекания выше, что объясняется развитой поверхностью, повышенной химической активностью, сниженной теплопроводностью материала в результате измельчения, увеличенной адсорбционной способностью пыли. Это обуславливает меньший период индукции воспламенения, большую скорость распространения горения, а также повышенную склонность к самовозгоранию по сравнению с исходным материалом, из которого пыль получена.

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

Тлеющая пыль представляет большую опасность, поскольку:

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

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

Аэрозоли воспламеняются и горят аналогично газоздушным смесям. Поэтому их пожарная опасность характеризуется такими же параметрами: концентрационным пределом распространения, минимальной энергией зажигания, максимальным давлением взрыва.

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

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

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

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

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

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

опасности принимается НКППП. В осевшем состоянии пыль может самовоспламеняться и самовозгораться, поэтому для оценки пожароопасных свойств аэрогеля используют температуру самовоспламенения  $T_{св}$ .

Все горючие пыли можно разделить на две группы и четыре класса:

*Первая группа – взрывоопасные пыли.*

Это пыли, способные к кинетическому горению и имеющие нижний концентрационный предел распространения пламени до  $65 \text{ г/м}^3$  включительно:

1-й класс – наиболее взрывоопасные пыли с НКППП  $15 \text{ г/м}^3$  и ниже;

2-й класс – взрывоопасные пыли с НКППП от  $15$  и до  $65 \text{ г/м}^3$ .

*Вторая группа – пожароопасные пыли:*

3-й класс – наиболее пожароопасные пыли с температурой самовоспламенения  $T_{св}$  не выше  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

4-й класс – пожароопасные пыли с  $T_{св}$  выше  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

НКППП пылевоздушных систем зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются:

- мощность источника зажигания,
- влажность пыли,
- зольность материала,
- содержание летучих компонентов,
- содержание негорючих газов,
- дисперсность пыли.

## **4.5. Пожары полигонов твердых бытовых отходов (свалок)**

В результате разложения твердых бытовых отходов (ТБО) на свалках и полигонах образуется биогаз, содержащий около 5 % водяного пара, 1 % кислорода, 40 % углекислого газа, 3 % водорода, 45 % метана, 5–6 % других газов. За несколько десятков лет из тонны ТБО может образоваться до  $400 \text{ м}^3$  биогаза, причем 70–80 % образуется за первые 10–15 лет функционирования свалки. В первые 4–5 лет скорость выделения биогаза составляет  $15\text{--}20 \text{ м}^3/\text{год}$  [9]. Биогаз образуется в три стадии: на аэробной стадии микроорганизмы разлагают органику (целлюлозу, углеводороды, травы и т. д.) и выделяется в основном углекислый газ и вода. Температура на глубинных слоях свалки повышается до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . На второй стадии, длящейся несколько лет, анаэробные бактерии, которым не нужен кислород, продолжают разлагать органику с выделением углекислого газа, спиртов

и небольшого количества водорода. Метаногенная – третья стадия – длится несколько десятилетий. Основные продукты деятельности метаногенных бактерий – метан и углекислый газ. На скорость выделения биогаза влияют биогенные элементы – фосфор и азот, а также температура, которая в глубинных слоях свалки составляет около 40 °С. Распространение метана в воздухе создает взрывоопасную и пожароопасную обстановку на полигонах и является причиной загораний и пожаров. Горение ТБО протекает в диффузионном режиме. Тепловой поток от зоны горения создает конвективную колонку, в результате чего продукты горения распространяются в воздух, тем самым загрязняя окружающую среду.

К ТБО относятся: бумага, пластмассы, пищевые отходы, металл, стекло, шлак и др. Средняя теплота сгорания мусора составляет ориентировочно 6000–9000 кДж/кг, и с каждым десятилетием значение теплоты сгорания мусора увеличивается, так как с ростом уровня жизни в составе мусора увеличивается объем горючих упаковочных материалов, которые в основном состоят из бумаги, картона, пластмасс и фольги.

Большое количество ТБО и производственного мусора, образующегося в крупных городах и промышленных центрах, часто является причиной пожаров не только на свалках и специально отведенных местах вблизи домов, но и на несанкционированных для этого площадках, на объектах промышленности и строительства. В Москве выезды на пожары, связанные с загоранием отходов, составляют 40 % общего числа выездов. Часто пожары свалок сопровождаются гибелью людей.

## 4.6. Лесные пожары

**Лесной пожар** – стихийное, неуправляемое распространение огня по лесной территории.

В лесах накапливается до 60 т/га лесных горючих материалов. Древостой представляет собой сложную трехъярусную структуру. Большие запасы напочвенных лесных горючих материалов способствуют развитию высокоинтенсивных низовых пожаров. Подрост же первого и второго классов возраста и низко опущенные кроны деревьев способствуют переходу низового пожара в верховой. При верховом пожаре перед его фронтом летят сотни горящих углей, которые зажигают деревянные строения.

Лесные пожары возникают при наличии горючих материалов, условий, способствующих загоранию этих материалов, и источника огня. Они начинаются обычно с момента загорания опада, живого напочвенного покрова,

лесной подстилки и других горючих материалов. Под влиянием климатических (засухи) и лесорастительных особенностей в весенний и осенний периоды возникает больше пожаров, чем в летний. Ветер способствует распространению огня. Источники пожаров бывают природными (молнии, самовозгорание) и антропогенными (искры, непотушенный костер, осколки стекол в виде линз, взрывы). На 10-километровую зону вокруг жилых массивов приходится большинство пожаров. В слабозаселенных местностях (Архангельская область, Коми, Сибирь, Дальний Восток) 50 % пожаров возникают из-за молний. Обочины дороги, зоны авиабаз – это коридоры повышенной опасности. Во влажных тропических лесах, где происходит равномерное выпадение осадков, опасность возникновения пожара меньше. По мере удаления от тропиков периоды без дождей выражены четче.

Периодичность пожаров в том или ином регионе связана с типом леса, с филогенетическими и фитоценоотическими изменениями леса во времени, с деятельностью человека, с изменениями погоды. Пожароопасный сезон в лесу устанавливается с того момента, как исчезает снежный покров и лесные горючие материалы высыхают до состояния загораемости. Основное число пожаров в нашей стране происходит с апреля по сентябрь-октябрь.

Лесные пожары, как и леса, – явление географическое. Так, все тропические леса расположены в зонах высоких температур, а бореальные – в областях с вполне умеренным климатом. Тем не менее первые находятся в зоне высокой влажности, и крупные пожары здесь (например, в Бразилии) имеют антропогенный генезис, тогда как зоны саванн, субтропические зоны и бореальные леса достаточно часто подвержены воздействию естественных факторов (например, молний). Для зон бореальных лесов в засушливые периоды характерно возникновение подземных и в первую очередь торфяных пожаров. Существенное влияние оказывают и города, многочисленное население которых отдыхает в зоне прилегающего леса, не соблюдает элементарные требования пожарной безопасности, что часто приводит к пожарам абсолютно антропогенного происхождения.

Различают степень опасности возникновения пожаров и их развития в различных регионах по следующим параметрам:

- *сезонность горимости лесов*, т. е. неодинаковые сроки наступления и окончания пожарных сезонов;
- *различия горимости лесов* в связи с неодинаковой плотностью населения и характером его деятельности;
- *географическое различие* самих лесов;
- *особенности послепожарных изменений* в лесах разных регионов.

«Зимние» пожары (в засушливый период) наблюдаются в Австралии, Индии, Африке с конца декабря до середины марта.

В пределах сезона выделяют пожароопасные и непожароопасные периоды. Так, разрастание трав в конце весны сдерживает появление и распространение пожаров, а отмирание их в начале осени восстанавливает горимость участков.

Причина возникновения пожаров в зимний период заключается в том, что и низкие температуры воздуха могут сопровождаться низкой относительной влажностью воздуха и высушиванием горючих материалов. Поэтому при отсутствии снежного покрова возможны загорания.

*Пожароопасные пояса:*

1 – северная граница на широте Киева (мартовские и апрельские пожары);

2 – от 50 до 56° с. ш. (апрельские пожары);

3 – подзона тайги до 59° с. ш. (майские пожары);

4 – средняя и северная тайга севернее 59° (пожары в мае-июне).

Пожары в течение суток возникают чаще всего после полудня, особенно в солнечные дни, когда воспламеняемость горючих материалов наиболее высокая. Днем воздух более теплый и сухой, соответственно и меньше влажность горючих материалов.

По характерным признакам развития и распространения различают низовые, верховые и подземные пожары.

*Низовые пожары* – это горение сухого надпочвенного покрова, состоящего из мхов, лишайников, вереска, черники, кустарников, подстилки (рис. 4.6). При этом повреждаются подрост, подлесок, нижняя часть стволов и корни. Высота пламени до 2–2,5 м. Скорость горения зависит от ветра, влажности и количества горючих материалов. Низовой пожар характеризуется вытянутой формой площади пожара. Густой, светло-серого цвета дым на таком пожаре сильно затрудняет оценку основных элементов фронта, тыла и флангов. Ориентироваться в обстановке крупного пожара порой возможно только с помощью авиационной разведки.

Низовые пожары бывают беглые и устойчивые (медленные).

*Устойчивый низовой пожар* – такой пожар, который распространяется по нижнему ярусу леса (валежник, подлесок), охватывая нижние части стволов деревьев и выступающие на поверхность корни. Скорость распространения не более 0,5 м/мин.

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



Рис. 4.6. Фронт низового пожара  
(Фотография предоставлена С. С. Воеводой)

*Верховые пожары* – сложное, грозное и динамичное явление, которое приобретает порой характер стихийного бедствия (рис. 4.7). Даже небольшое промедление в принятии мер по ограничению распространения пожара может привести к поражению огнем значительной площади лесных массивов и расположенных в них населенных пунктов.

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

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

*Беглый верховой пожар* – возникает только при сильном ветре, огонь распространяется по кронам деревьев «скачками», опережая фронт низового пожара. Ветер также разносит горящие ветви, другие мелкие горящие объекты и искры, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров впереди основного очага. В ряде случаев огонь «перебрасывается» указанным способом через реки, широкие дороги и другие рубежи для локализации пожара. «Скачки» таких пожаров распространяются



со скоростью  $V = 15 \div 25$  км/ч, однако средняя скорость распространения беглого верхового пожара несколько меньше, так как после «скачка» пламени происходит задержка распространения фронта пламени до тех пор, пока низовой пожар не пройдет участок с уже сгоревшими кронами.

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



Рис. 4.7. Верховой пожар

Наиболее пожароопасны сосновые леса, потом лиственничные, пихтовые и еловые, затем смешанные и, наконец, лиственные. Среди сосновых лесов самые горючие лишайниковые и вересковые боры, затем брусничные, далее кисличные и черничные и, наконец, травяные и сфагновые (болото). Среди еловых наиболее горючие леса с брусничником, далее с черничником и затем травяно-сфагновые. При классификации учитывают типы леса и площадь каждого типа, соотношенную к общей площади.

*Подземные (торфяные, почвенные) пожары.* Торф – отложения органического происхождения, состоящие из остатков болотных растений, лиственных и хвойных деревьев, трав, подвергшихся неполному разложению при недостаточном доступе кислорода. Подсушенный торф является горючим материалом, а его загорание возможно в результате самовозгорания или от источника горения. Торф со степенью разложения 30 % не горит при влагосодержании 69–72 % [9]. Самовозгорание торфа происходит в результате самонагревания за счет химических и

микробиологических процессов. Торфяная пыль также способна к взрывному горению [10]. При концентрации пыли в воздухе 1–2 кг/м<sup>3</sup> скорость распространения пламени достигает 22 м/с. Согласно ГОСТ 12.1.041–83, торфяная пыль во взвешенном состоянии характеризуется следующими показателями: НКППП – 50 г/м<sup>3</sup>, максимальное давление взрыва – 250 кПа, минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) – 11 %. Горение торфа происходит при недостатке кислорода, поэтому температура пожара на полях добычи торфа довольно низкая – 300–500 °С, в зависимости от влажности. В штабелях температура горения на 150–250 °С выше [11]. Вследствие низкой температуры в продуктах горения торфа содержится много ядовитых соединений.

Торфяные пожары могут возникать в местах, где не ведется промышленная разработка месторождений. Такие пожары случаются довольно часто в заболоченных лесах при сильных засухах и при мощности торфяного горизонта 0,2–0,7 м [12]. Они возникают в середине лета – в период засухи и осенью после усыхания осок и злаков. При неблагоприятных метеоусловиях (после выпадения дождя) или после разрастания трав в июле-августе зона горения перемещается под поверхность, и горение продолжается в виде подземных очагов. При отсутствии на поверхности внешних признаков горения распространение пожара представляет опасность для людей, так как они могут проваливаться в образующиеся и незаметные сверху пустоты. При почвенных торфяных пожарах выгорают корни деревьев, поэтому деревья падают в непредсказуемом направлении. Скорость распространения почвенных пожаров не более 1 м/сут. Болота и заболоченные леса в тайге периодически испытывают воздействие таких пожаров. Вертикальное заглубление открытых пожаров торфа происходит при 200%-й влажности торфа, а горизонтальное подземное распространение горения возможно при 300–500%-й влажности [9].

При переходе низового пожара в подземный дальнейшее его развитие может продолжаться до весны, распространяясь со скоростью около 10 м/мес. Прогрев почвы варьируется в пределах от 91–150 °С до 200–700 °С. Такие пожары не приводят к полному выгоранию торфа из-за присутствия в нем водоизбыточных горизонтов и не изменяют его кислотнощелочные свойства. Растительность после таких пожаров легко восстанавливается, так как в местах распространения пожара образуется большое количество биогенных элементов (азот, фосфор) и органических гумусовых кислот [13, 14].

Торфяные и болотные пожары способствуют развитию лесных экосистем. При этом удлиняются этапы лесных стадий болот, а леса отличаются высокой продуктивностью. Но вблизи населенных пунктов торфяные пожары наносят экологический, социальный и экономический ущерб.

Степень пожарной опасности в лесу по условиям погоды определяется по принятому в лесном хозяйстве комплексному показателю В. Г. Нестерова, который вычисляется на основе данных о температуре воздуха (в градусах Цельсия), температуре точки росы (в градусах Цельсия), количестве выпавших осадков (в миллиметрах).

Для вычисления комплексного показателя пожарной опасности (КППО) в лесу по условиям погоды необходимо учитывать следующие параметры:

– температуру воздуха (в градусах Цельсия) и точки росы на 12 ч по местному времени;

– количество выпавших осадков (в мм) за предшествующие сутки, т. е. за период с 12 ч предыдущего дня (осадки до 2,5 мм в расчет не принимаются).

Комплексный показатель текущего дня рассчитывают по формуле

$$КП = \sum_{i=1}^n t_i(t_i - r_i), \quad (4.1)$$

где  $n$  – число дней после дождя;

$r$  – температура точки росы;

$t$  – температура воздуха.

Общероссийская шкала имеет пять классов пожарной опасности в лесу по условиям погоды (табл. 4.1).

Таблица 4.1

**Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды**

Класс пожарной опасности по условиям погоды	Значение комплексного показателя	Степень пожарной опасности
I	До 300	Отсутствие опасности
II	От 301 до 1000	Малая
III	От 1001 до 4000	Средняя
IV	От 4001 до 10000	Высокая
V	Более 10000	Чрезвычайная опасность

Рассчитанные значения КППО формируются в специальные таблицы по административному и территориальному признаку, наносятся на карты и передаются в центральную базу авиационной охраны лесов «Авиалесоохраны», а также в МЧС России. В свою очередь, «Авиалесоохрана» при взаимодействии с территориальными базами охраны лесов использует эту информацию для планирования использования расчетов контрольных патрульных облетов охраняемых территорий и ресурсов пожаротушения.

Поражающие факторы лесных пожаров и характер их действия приведены в табл. 4.2, а основные диагностические признаки для определения вида лесного пожара и его интенсивности в табл. 4.3.

Таблица 4.2

### Поражающие факторы лесных пожаров

Источник ЧС	Поражающий фактор	Характер действия, проявления поражающего фактора
Лесной пожар	Теплофизический – по ГОСТ Р 22.0.06	Пламя Нагрев тепловым потоком
	Химический – по ГОСТ Р 22.0.06	Тепловой удар Помутнение воздуха Опасные дымы
Лесной пожар радиоактивный	Теплофизический	По ГОСТ Р 22.0.06. Также недостаток кислорода в зоне горения, разлет горящих частиц, огненные вихри и смерчи
	Химический	По ГОСТ Р 22.0.06
	Радиофизический	Ионизирующие излучения, образование радиоактивных продуктов горения ЛГМ – открытых источников ионизирующего излучения.  Радиоактивное загрязнение атмосферы, почвы, растений, гидросферы. Недостаток кислорода в зоне горения, разлет горящих частиц, огненные вихри и смерчи

Таблица 4.3

### Основные диагностические признаки для определения вида лесного пожара и его интенсивности

Вид и интенсивность пожара	Классы пожарной опасности погоды	Основные виды горючих материалов, особенности пожара и характер повреждения лесного фитоценоза
<i>Низовой беглый пожар</i>		
Слабая	I–II	Возникают на участках с травяным (весной, осенью) и лишайниковым (весь сезон) покровом, а также в лиственных насаждениях (весной и осенью), где опад сформирован из опавшей листвы деревьев и кустарников. В основном сгорает сухая трава, лишайник или опад листвы. Высота нагара на стволах до 1 м, скорость распространения до 1 м/мин, высота пламени до 0,5 м. Интенсивность горения (мощность тепловыделения с 1 пог. м кромки пожара) – до 100 кВт/м
Средняя	III	Высота нагрева на стволах 1–2 м, скорость распространения 1–3 м/мин, высота пламени 0,5–1,5 м. Теплота пожара более 101–750 кВт/м

Вид и интенсивность пожара	Классы пожарной опасности погоды	Основные виды горючих материалов, особенности пожара и характер повреждения лесного фитоценоза
Сильная (высокая)	IV	Высота нагрева на стволах более 2 м, скорость распространения свыше 3 м/мин, высота пламени более 1,5 м. Теплота пожара более 750 кВт/м
<i>Низовой устойчивый пожар</i>		
Слабая	II	Кроме неразложившегося спада (ветошь, листва и т. д.) дополнительно сгорает живой надпочвенный покров и верхний слаборазложившийся слой подстилки
Средняя	III	Дополнительно сгорает полуразложившийся слой подстилки, а вокруг комлевой части стволов и валежа она прогорает до минеральной почвы
Сильная (высокая)	IV–V	Подстилка сплошь сгорает до минеральных горизонтов почвы. Наблюдается падение отдельных деревьев
<i>Торфяной пожар</i>		
Слабая	III	Сфагнум сгорает на глубину до 7 см, между корневыми лапами торф прогревает на 30–40 см. Остаются отдельные участки несгоревшего сфагнума и багульника размером 3–200 м <sup>2</sup>
Средняя	IV	Кроме сфагнума сгорает торф на глубину до 25 см. У большинства стволов вокруг их комлевой части торф сгорает до минеральных слоев почвы. Отдельные деревья падают. Пожар имеет многоочаговый характер
Сильная (высокая)	IV–V	Торфяные слои сгорают сплошь до минеральной части почвы. Наблюдается массовый вывал деревьев. Древоустой погибает полностью
<i>Верховой пожар</i>		
Слабая	III	Возникает в хвойных насаждениях со слабой сомкнутостью полога или в тех, в состав которых входят лиственница и лиственные породы с долей участия более 3 единиц. Пожаром повреждаются участки с групповым расположением хвойных пород. Причем огонь по кронам распространяется снизу вверх и в основном за счет поддержки низового пожара
Средняя	IV	Верховой огонь по кронам древоустоя распространяется также и горизонтально и часто опережает кромку низового пожара. Большая часть древоустоя (до 60 %) повреждается верховым пожаром
Сильная (высокая)	IV–V	Полог древоустоя сгорает сплошь или остается не сгоревшим только пятнами в отдельных местах

## 4.7. Особенности горения лесных материалов

При лесных пожарах в основном горят клетчатка и лигнин, составляющие стенки клеток растений, а также смолы и эфирные масла. В результате нагрева горючего материала (древесины) до 100–150 °С ускоряется испарение воды, а при дальнейшем повышении температуры начинается процесс его разложения. При этом выделяются летучие вещества, которые, смешиваясь с воздухом, образуют горючую смесь и легко воспламеняются. Чем быстрее происходит нагрев, тем выше концентрация газов и при достижении НКПП происходит воспламенение. Хвоя вспыхивает от источника зажигания при собственной температуре 200 °С. Но при замедлении подогрева температура воспламенения может повыситься до 400 °С. Если подогрев еще больше замедлить, то хвоя обуглится, но не загорится.

Распространение горения по территории происходит при условии взаимного соприкосновения горючих материалов или при минимальном расстоянии между ними, т. е. при наличии сплошного ковра из горючих материалов с достаточно рыхлым их расположением. Горение может распространяться внутрь при достаточном нагреве внутренних слоев и их горючести.

Мелкий опад и живой напочвенный покров, а также живая хвоя деревьев и мелкие сучья горят низким пламенем. При проникновении горения во внутренние слои горючих материалов: лесной подстилки, торфа, внутренних частей валежника, стволов, пней – обычно наблюдается беспламенное горение.

В лесном пожаре:

- *проводят горение* – мхи, лишайники с мелким опадом, лесная подстилка, торф, валежник, пни, горящие отдельные стволы деревьев;
- *поддерживают горение* – травы, кустарнички, самосев древесных пород, подрост, подлесок, хвоя, охвоенные ветки и мелкие сучья полога древостоя;
- *задерживают распространение горения* – некоторые кустарнички и травы (люпин многолетний, бадан, сахалинская гречиха), кустарники (серая ольха, спирея) и лиственные деревья (липа, осина, тополь).

Лесные горючие материалы разнообразны по характеру реакции на изменение погоды и по горимости, поэтому по-разному в них возникает и распространяется пожар.

Группы лесных горючих материалов:

- 1 – мхи и лишайники с мелким опадом;
- 2 – травы и кустарнички;
- 3 – подрост и подлесок;

- 4 – лесная подстилка и торф;
- 5 – валежник, гнилые пни и деревья;
- 6 – хвоя, охвоенные ветки и сучья в пологе древостоя.

Состояние материалов групп 1, 4 и 5 зависят от погоды (количества осадков и числа дней после дождя).

Рассмотрим группы подробнее:

**Группа 1** – горючий первичный материал. Он существенно зависит от погоды. Лишайники рода кладония очень быстро теряют влагу, медленнее высыхают мхи, еще медленнее – подстилка, гнилые пни и валежник. Загорание происходит при влагосодержании 25–40 %. Эти материалы активные проводники горения. Влажность опада из хвои, сосняка верескового и мшистого в момент появления загораемости составляет 14–15 % от массы, зеленой верхней части мхов – 30 %, сосняка мшистого – 21–28 %, а в нижней части – 42–52 %. Лишайники горят при влажности 16 %. Опад из хвои ускоряет горение мхов.

**Группа 2** – черника, брусника, вереск, багульник и др. Имеют устойчивую влажность и самостоятельно гореть не могут. Необходимо наличие под ними материала 1-й группы. Наиболее пожароопасны багульник и вереск.

**Группа 3** – подрост и вереск. Имеют сравнительно высокую влажность, листовая часть сдерживает горение, а хвойная поддерживает. Их влажность почти не зависит от состояния погоды, так как она постоянна. Они способствуют образованию рыхлой структуры мелкого опада, поэтому опад быстро высыхает и интенсивно горит.

**Группа 4** – лесная подстилка и торф. Имеют влажность от 6 до 250 % на свежих почвах и до 650 % на торфяниках. Характерно медленное высыхание, поэтому их возгорание происходит чаще во 2-й половине лета и осенью. Пожары на торфяниках могут не прекращаться даже зимой. Костры на торфяниках крайне опасны и недопустимы.

**Группа 5** – валежник, гнилые пни и др. Влажность меняется широко, но медленно, поэтому скрытые очаги могут сохраняться долго.

**Группа 6** – хвоя, охвоенные ветки и сучья. Устойчивая и высокая влажность. Воспламеняются только при горении других материалов. В древостоях из лиственных пород пожары, как правило, прекращаются. Поэтому стремятся специально выращивать высоковлажную растительность (толокнянку, кошачью лапку, бессмертник) для борьбы с пожарами. А сахалинская гречиха – многолетняя трава, достигающая 2–3 метров, не горит даже если ее облить керосином. Присутствие черники в брусничных лесах ослабляет силу пожаров.

## 4.8. Тушение лесных пожаров

Технология тушения лесных пожаров определяется способами тушения и применяемыми при этом техническими средствами. Существуют следующие способы тушения лесных пожаров:

- захлестывание кромки низовых пожаров (в процессе захлестывания зелеными ветвями, метлами, мешковиной, другими предметами горящие частицы сметаются в сторону пожара);

- засыпка кромки низовых пожаров (в процессе засыпки грунтом с помощью лопат или грунтометов механически сбивается пламя, охлаждаются горючие материалы и ограничивается доступ к ним воздуха);

- прокладка заградительных минерализованных полос и канав (с помощью фрезерных или грунтометательных машин, бульдозеров, плугов или граблями вручную останавливают движение кромки пожара);

- использование взрывчатых веществ (взрывным методом устраивают заградительные траншеи и канавы (рвы), чтобы ограничить распространение пожара, или сбивают фронт пламени взрывной волной);

- пуск встречного низового огня (отжиг) (перед надвигающимся фронтом пожара от существующих или специально созданных опорных рубежей выжигают надпочвенный покров на достаточно широкой полосе, создавая тем самым широкую заградительную полосу, лишенную горючего материала);

- тушение пожара водой;

- тушение пожара химикатами (с помощью ранцевых опрыскивателей и насосов пожарных автоцистерн). В их качестве выступают разнообразные добавки к воде – смачиватели в виде различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) или обычных пенообразователей (до величины поверхностного натяжения  $\sim 36$  мН/м,  $\sim 4\text{--}6$  % ПАВ) или для повышения вязкости воды добавкой загустителей – примерно до  $1\text{--}2$  % Na-КМЦ (натрий-карбоксиметилцеллюлозы);

- тушение с помощью авиации (высадка десанта со ВВ, перекладка рукавных линий или доставка воды на гидросамолетах, вертолетах);

- тушение с помощью искусственного вызывания осадков путем обстрела облачного фронта ракетами (йодистое серебро и др.) с самолетов, наземных легких ракетных установок или зенитной артиллерии, предназначенной также для борьбы с градом.



## 4.9. Последствия лесных пожаров

Анализ данных за последние 100 лет показывает, что количество пожаров неуклонно увеличивалось начиная с 1920-х годов, т. е. с момента начала активной лесохозяйственной деятельности и торфоразработок на территории СССР. Еще более оно возросло в 1960–1970-х годах (расширение сельскохозяйственных угодий в нечерноземных областях европейской части России). Только в 2010 году в Российской Федерации зарегистрированы 33 571 лесных пожаров, которыми пройдены 2,1 млн га территорий лесного фонда. По сравнению с аналогичными показателями 2009 года отмечено увеличение числа лесных пожаров в 1,5 раза. Ущерб от лесных пожаров 2010 года по состоянию на 1 октября оценивается в 85,5 млрд руб. Независимо от типа пожара и группы горючих материалов, участвующих в нем, практически нерешенной до сегодняшнего дня является проблема тушения лесных пожаров.

По сути, с тех пор и по сегодняшний день для тушения лесных пожаров практически не было предложено сколько-нибудь эффективных инновационных методов тушения.

Используют в основном традиционные методы, требующие близкого присутствия человека к очагу пожара – сбивание кромки пламени, окапывание, встречный пал. Тушение водой применяют редко – вследствие элементарной недоступности водоисточников в засушливый пожароопасный период. Использование авиации для доставки воды и ее сброса в очаги пожара многие специалисты признают малоэффективным вследствие малых количеств перевозимой воды (вертолеты) и сложности точного водосброса из быстролетящего самолета. От пилотов при этом требуется ювелирная точность работы в условиях пониженной видимости, опасности малых высот и сильнейших восходящих потоков над очагом пожара.

Опыт 2010 года показал:

1. Всерьез тушением пожаров занялись только в августе, когда уже полыхали деревни и гибли люди.

2. В большинстве случаев сотрудники пожарной охраны не были готовы противостоять лесным пожарам.

3. Наиболее действенным средством, как и в старину, оказалась не «водонесущая» авиация, а «встречный пал» (только мало кто умеет грамотно его применять).

4. Результативность тушения крупных пожаров составляет 4–5 %. Те же результаты по мировому опыту – в США, Канаде, даже во Франции (при всей мощи и многочисленности ее пожарной авиации).

5. Основную работу по пожаротушению выполнила другая стихия – начавшиеся во второй половине августа дожди.

## Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются твердые горючие материалы?
2. Назовите основные причины воспламенения ТГМ.
3. В чем заключается механизм воспламенения ТГМ?
4. В чем заключается механизм распространения пламени по поверхности ТГМ?
5. В чем заключается механизм воспламенения и горения пылей?
6. По каким параметрам оценивают степень опасности возникновения и развития лесных пожаров в различных регионах?
7. Как и по каким признакам классифицируются лесные пожары?
8. Назовите особенности горения лесных массивов.
9. Назовите причины, не позволяющие эффективно тушить лесные пожары.

## 5. Внутренние пожары

---

В настоящее время около 90 % пожаров во всем мире происходит внутри различных помещений. Такие пожары наносят наибольший суммарный социальный, экономический и экологический ущерб. При пожарах в помещениях ежегодно погибает людей больше, чем в различных войнах и вооруженных конфликтах. Даже грубый расчет показывает, что при горении мебели на рядовом пожаре в городской квартире, который имеет среднестатистическую площадь около  $5 \text{ м}^2$ , среднеобъемную температуру  $500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$ , за время свободного развития (около 20 мин) в окружающую среду выбрасывается  $500\text{--}900 \text{ м}^3$  продуктов горения. В их состав входит, как известно, ряд вредных и отравляющих веществ. Только в Москве суммарный объем выбросов в атмосферу от квартирных пожаров ежегодно составляет  $(6\text{--}12)10^6 \text{ м}^3$ .

Первичный очаг пожара в большинстве случаев является точечным. То есть его площадь в момент возникновения намного меньше площади поверхности горючей нагрузки в помещении. Возникший процесс горения сначала стремится охватить максимально возможную площадь, если его вовремя не ликвидировать, он может распространиться на все помещение очага пожара, затем на смежные помещения, в результате пламенем будет охвачено все здание. При этом обстановка на пожаре во многом определяется развитием пожара в помещении первичного очага.

В данной главе рассматриваются основные особенности и взаимосвязь процессов горения, тепло- и газообмена, их влияние на динамику и параметры внутренних пожаров. Анализ проводится в рамках интегральной модели, согласно которой принимается, что газовая среда в помещении в каждый момент времени представляет собой хорошо перемешанную однородную смесь. Состояние этой смеси характеризуется среднеобъемными значениями температуры, плотности, давления.

### 5.1. Возникновение и развитие газообмена при пожаре. Его основные параметры

Статическое давление газовой смеси внутри помещения и воздуха снаружи изменяется по высоте в соответствии с законом Паскаля. В первом приближении можно считать, что это распределение является линейным и описывается выражением:  $p = p_0 - \rho gh$ , где  $p$  – давление столба газа высотой  $h$ , Па;  $p_0$  – давление газа на базовой плоскости ( $h = 0$ ), Па.

До пожара распределение давлений воздуха по высоте внутри и снаружи помещения, как правило, складывается так, что в верхней части давление больше, а в нижней части – меньше атмосферного (рис. 5.1).

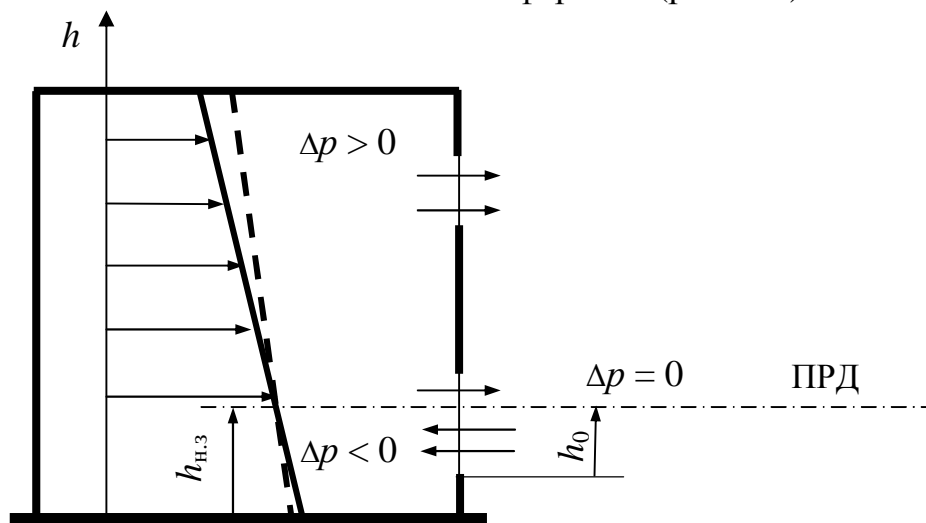


Рис. 5.1. Распределение давлений внутри и снаружи помещения:  
сплошная линия – эпюра давлений воздуха снаружи;  
пунктирная линия – эпюра давлений воздуха внутри помещения

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

Через все отверстия, расположенные выше ПРД, воздух вытекает из помещения, ниже ПРД – поступает в помещение (см. рис. 5.1).

Возникновение очага горения в помещении сразу вызывает повышение давления газовой среды, так как объем продуктов горения, даже при нормальных условиях, больше объема израсходованного воздуха. Среднеобъемная температура и, соответственно, плотность газовой среды в первый момент изменяются незначительно. В соответствии с выражением  $p = p_0 - \rho gh$  распределение давлений по высоте помещения также остается практически неизменным. В результате этого давление газов внутри помещения на всех уровнях возрастает на одну и ту же величину, эпюра давлений смещается практически параллельно, ПРД опускается. При этом, как правило, ПРД оказывается ниже нижней отметки проема, и газы вытекают из помещения через все имеющиеся отверстия (открытые проемы, щели и т. п.) независимо от их расположения (рис. 5.2). Процесс горения в такой ситуации развивается за счет запаса кислорода, имевшегося в помещении.

По мере развития процесса горения среднеобъемная температура повышается, плотность газовой среды уменьшается – эпюра давлений поворачивается. Одновременно с этим снижается концентрация кислорода

в газовой среде, которая поступает в зону горения – в результате скорость выгорания уменьшается. Соответственно уменьшается скорость расширения газовой среды, и давление внутри помещения начинает снижаться – эпюра давлений смещается влево, ПРД поднимается (см. рис. 5.2). Через проемы, расположенные ниже ПРД, в помещение поступает воздух, через проемы, расположенные выше ПРД, выталкивается образующаяся смесь газов, состав которой изменяется по мере развития процесса горения.

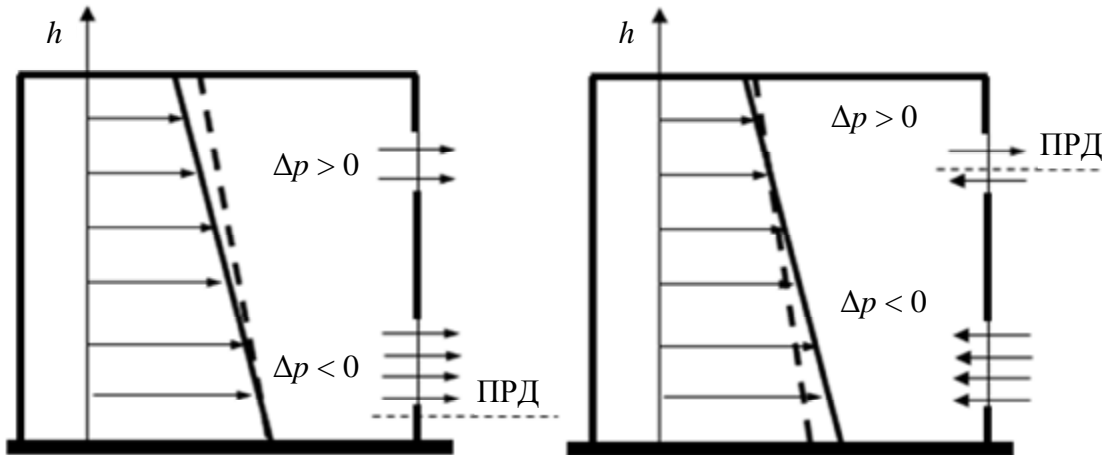


Рис. 5.2. Изменение положения ПРД при появлении и развитии очага горения

Газообменом на внутреннем пожаре является вентиляция помещения, инициируемая процессом горения и тесно с ним взаимосвязанная.

Основными параметрами газообмена являются:

- *требуемый расход воздуха*  $G_B^0$ , кг/с, – расход воздуха, необходимый для полного сгорания материала с данной массовой скоростью;
- *фактический расход воздуха*  $G_B^{\phi}$ , кг/с, – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени;
- *коэффициент избытка воздуха*  $\alpha$ , равный отношению:

$$\alpha = G_B^0 / G_B^{\phi}. \quad (5.1)$$

Требуемый расход воздуха находится по формуле

$$G_B^0 = v_M^{уд} S_{\Pi} V_B^0 \rho_B, \quad (5.2)$$

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

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

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

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

В качестве примера рассмотрим пожар в помещении с одним открытым проемом.

В ходе развития пожара параметры процессов горения, тепло- и газообмена изменяются. Во многом это определяется положением плоскости равных давлений относительно верхней и нижней отметок проема. В начальный момент возникновения притока воздуха в помещение плоскость равных давлений, как правило, оказывается на уровне потолка. По мере развития процесса горения и, соответственно, увеличения объема выделяющихся газов она опускается. Это продолжается до тех пор, пока массовая скорость выгорания горючего  $v_m$  не достигнет максимального значения.

Пока ПРД располагается выше верхней отметки проема, газы из помещения не удаляются, и проем работает только на приток воздуха. Если ПРД находится между верхней и нижней отметками проема, выше ПРД из помещения выходят нагретые газы, ниже – в помещение поступает воздух. В тех случаях, когда ПРД опускается ниже нижней отметки проема, приток воздуха в помещение прекращается, интенсивность горения уменьшается, массовая скорость выгорания падает. Вследствие этого уменьшается объем выделяющихся газов и, соответственно, давление в помещении. Плоскость равных давлений поднимается, и в помещение поступает воздух.

Для оценки фактического расхода воздуха  $G_B^\phi$  рассмотрим ситуацию в момент времени, когда ПРД располагается между верхней и нижней отметками проема на высоте  $h_0$  относительно пола. ПРД будем считать базовой плоскостью, на которой давление газов  $p_r$  и воздуха  $p_b$  равны  $p_0$ . Давление на этом уровне примем в качестве точки отсчета –  $p_0$  (рис. 5.3).

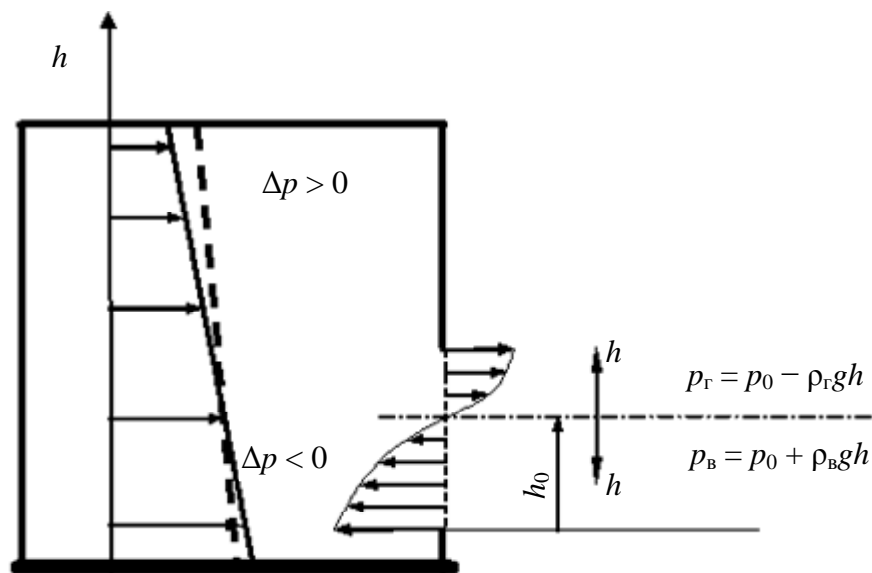


Рис. 5.3. Схема распределения давлений и газовых потоков при пожаре в помещении: стрелками показано направление движения газовых потоков; сплошная линия – эпюра давлений воздуха снаружи; пунктирная линия – эпюра давлений газовой среды внутри помещения

Тогда на расстоянии  $h$  от ПРД давление газов будет равно  $p_{\Gamma} = p_0 - \rho_{\Gamma}gh$ , воздуха –  $p_{\text{в}} = p_0 + \rho_{\text{в}}gh$  ( $\rho_{\Gamma}$  и  $\rho_{\text{в}}$  – плотности газов и воздуха, соответственно).

Разность давлений газа (внутри помещения) и воздуха (снаружи) на расстоянии  $h$  будет равна:

$$\text{выше ПРД} \quad \Delta p = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})gh > 0;$$

$$\text{ниже ПРД} \quad \Delta p = (\rho_{\Gamma} - \rho_{\text{в}})gh < 0.$$

Поскольку нас интересует не направление действия  $\Delta p$ , а его абсолютная величина, можем записать:  $|\Delta p| = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})gh$ . Величина  $\Delta p$  является избыточным статическим давлением, которое создает динамическое давление, равное  $\rho\omega^2/2$  ( $\omega$  – линейная скорость потока воздуха или газа). Тогда на расстоянии  $h$  от ПРД скорости потоков газа  $\omega_{\Gamma}$  и воздуха  $\omega_{\text{в}}$  будут равны:

$$\omega_{\Gamma} = \sqrt{2gh(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})/\rho_{\Gamma}}; \quad (5.3)$$

$$\omega_{\text{в}} = \sqrt{2gh(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})/\rho_{\text{в}}}. \quad (5.4)$$

Массовые расходы газа  $G_{\Gamma}$ , кг/с, и воздуха  $G_{\text{в}}$ , кг/с, через проем равны:  $G_{\Gamma} = \mu V_{\Gamma} \rho_{\Gamma}$  и  $G_{\text{в}} = \mu V_{\text{в}} \rho_{\text{в}}$ , где  $\mu$  – коэффициент аэродинамического сопротивления проема,  $V_{\Gamma}$  и  $V_{\text{в}}$  – объемы газа и воздуха, соответственно, проходящие через проем в единицу времени, м<sup>3</sup>/с.

Очевидно, что массовые расходы газов и воздуха находятся по выражениям:

$$G_{\Gamma} = \mu \rho_{\Gamma} B \int_0^{H-h_0} \omega_{\Gamma} dh; \quad (5.5)$$

$$G_{\text{в}} = \mu \rho_{\text{в}} B \int_{h_0}^0 \omega_{\text{в}} dh, \quad (5.6)$$

где  $B$  – ширина проема, м;

$H$  – высота проема, м;

$h_0$  – высота ПРД относительно нижней отметки проема, м;

0 – отметка базовой плоскости (ПРД).

После интегрирования получим:

$$G_{\Gamma} = (2/3)\mu \rho_{\Gamma} B \sqrt{2g(H-h_0)^3(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})/\rho_{\Gamma}}; \quad (5.7)$$

$$G_{\text{в}} = (2/3)\mu \rho_{\text{в}} B \sqrt{2gh_0^3(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})/\rho_{\text{в}}}. \quad (5.8)$$

При достижении стационарного режима газообмена, когда  $h_0$  перестает изменяться и некоторое время находится на одном уровне,  $G_{\Gamma} \approx G_{\text{в}}$ . На других стадиях пожара они различаются не более чем на 10–15 % [15].

Это позволяет в каждый момент времени считать процесс газообмена квазистационарным при  $G_{\Gamma} \approx G_{\text{в}}$ . Тогда, приравняв правые части выражений (5.7) и (5.8), получим выражение для оценки положения ПРД относительно нижней отметки проема:

$$h_0 = \frac{H}{1 + \sqrt[3]{\rho_{\text{в}} / \rho_{\Gamma}}}. \quad (5.9)$$

Подставив выражение (5.9) в выражение (5.8) и учитывая, что произведение  $BH$  равно площади проема  $S_{\text{пр}}$ , получим:

$$G_{\text{в}} = (2/3)\mu S_{\text{пр}} \sqrt{H} \sqrt{\frac{2g(\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma})\rho_{\text{в}}\rho_{\Gamma}}{(\sqrt[3]{\rho_{\text{в}}} + \sqrt[3]{\rho_{\Gamma}})^3}}. \quad (5.10)$$

Проведем анализ этой формулы. Коэффициент сопротивления проема изменяется в пределах 0,6–0,7. Можно считать, что  $\mu = 0,65$ . Используя уравнение Клапейрона, плотность газовой среды можно представить как

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\text{в}} \frac{T_0}{T_{\text{п}}}, \quad (5.11)$$

где  $T_0$  – температура воздуха, К;

$T_{\text{п}}$  – температура пожара, К.

Плотность воздуха обычно принимается равной  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , а  $T_0 = 293 \text{ К}$  (то есть  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Тогда  $\rho_{\Gamma} \approx 352 / T_{\text{п}}$ . Допустим, что в ходе развития пожара температура возросла от  $100$  до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Соответственно  $\rho_{\Gamma}$  понизилась с  $0,944$  до  $0,277 \text{ кг/м}^3$ . Если проемность помещения не изменилась, то  $G_{\text{в}}$  уменьшился от  $0,74S_{\text{пр}}\sqrt{H}$  до  $0,47S_{\text{пр}}\sqrt{H}$ . То есть при 10-кратном повышении температуры пожара массовый расход воздуха изменяется менее чем на 40 %. Поэтому фактический массовый расход воздуха, поступающего в помещение, приближенно можно оценить как

$$G_{\text{в}} \approx 0,61S_{\text{пр}}\sqrt{H}. \quad (5.12)$$

Произведение  $S_{\text{пр}}\sqrt{H}$  называется *параметром проемности помещения*. Чем выше интенсивность газообмена, тем больше холодного воздуха поступает в помещение, тем больше из него удаляется нагретых газов. Поэтому в помещениях с большой площадью вскрытых проемов максимальная температура пожара должна быть ниже. Соответственно, искусственное увеличение интенсивности газообмена путем применения вентиляторов, дымососов, вскрытия конструкций и т. д. в ходе тушения пожара должно приводить к понижению температуры газовой среды в очаге. Однако так бывает не всегда.



## 5.2. Тепловой баланс помещения при пожаре

На пожаре источником тепла является зона горения. Интенсивность тепловыделения прямо пропорциональна массовой скорости выгорания, что следует из формулы  $q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}} Q_{\text{н}}$ .

Если бы тепло, выделяющееся в зоне горения, расходовалось только на нагрев газовой среды внутри помещения, то ее максимальная температура постепенно достигала бы температуры пламени. Максимальная температура диффузионного пламени газов составляет около 1350 °С, большинства жидкостей – 1250 °С, твердых материалов – 1150 °С.

Однако часть тепла, выделяющегося в зоне горения, поглощают строительные конструкции, часть теряется в результате излучения через открытые проемы, затрачивается на нагрев горючих материалов (главным образом в ходе начальной стадии пожара), уходит из помещения вместе с продуктами горения через проемы. Все это приводит к тому, что температура внутреннего пожара всегда ниже температуры пламени. В общем виде тепловой баланс внутреннего пожара может быть представлен следующим уравнением:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{ср}} + q_{\text{уд}} + q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}}, \quad (5.13)$$

где  $q_{\text{ср}}$  – интенсивность накопления тепла газовой средой в помещении;

$q_{\text{уд}}$  – интенсивность удаления тепла из помещения нагретыми газами;

$q_{\text{м}}$  – интенсивность поглощения тепла горючими материалами во время их нагрева до воспламенения;

$q_{\text{к}}$  – интенсивность поглощения тепла ограждающими конструкциями;

$q_{\text{л}}$  – интенсивность излучения тепла за пределы помещения через проемы.

Температура газовой среды в помещении определяется величиной  $q_{\text{ср}}$ . Остальные составляющие правой части уравнения (5.13) являются потерями тепла. Чем выше потери, тем меньше  $q_{\text{ср}}$  и ниже  $T_{\text{п}}$ . Величина  $q_{\text{к}}$  зависит от теплофизических характеристик материалов, из которых выполнены ограждающие конструкции. Установлено, что с увеличением их теплопроводности максимальная температура пожара  $T_{\text{п}}$  снижается. Величина  $q_{\text{л}}$  определяется площадью проема, а также излучательной способностью пламени. Например, пламена спиртов прозрачные, малокоптящие. Их излучательная способность низкая,  $q_{\text{л}}$  также мала. Нефтепродукты, твердые горючие материалы при горении выделяют большое количество сажи, которая в пламени нагревается до температуры свечения. Пламена таких материалов имеют более низкую температуру, но более высокую интенсивность излучения.

Интенсивность поглощения тепла горючими веществами зависит от их теплофизических свойств, проявляется главным образом на начальной стадии пожара и на  $T_{\text{п}}$  влияет очень мало.

Таким образом,  $q_{л}$ ,  $q_{к}$ , и  $q_{м}$  обусловлены характеристиками здания и горючих материалов, находящихся в помещении. Поэтому управлять потерями тепла наиболее эффективно путем увеличения  $q_{уд}$ :

$$q_{уд} = G_{г}c_{p}(T_{п} - T_{0}), \quad (5.14)$$

где  $c_{p}$  – удельная теплоемкость выходящих газов при  $T_{п}$ ;  
 $T_{0}$  – начальная температура.

Представим сумму ( $q_{м} + q_{к} + q_{л}$ ) как долю потерь  $m$  от  $q_{п}$ . Тогда уравнение (5.13) можно переписать в виде:

$$q_{ср} = q_{п}(1 - m) - q_{уд}$$

или

$$q_{ср} = \beta v_{м}^{уд} S_{п} Q_{н}(1 - m) - G_{г}c_{p}(T_{п} - T_{0}). \quad (5.15)$$

Если  $q_{п}(1 - m) > q_{уд}$ , то  $q_{ср} > 0$  – интенсивность аккумуляции тепла газовой средой выше интенсивности потерь –  $T_{п}$  повышается.

Если  $q_{п}(1 - m) = q_{уд}$ , то  $q_{ср} = 0$  – система находится в динамическом равновесии, пожар протекает при установившемся (стационарном) теплогазообмене –  $T_{п} = \text{const}$ .

Если  $q_{п}(1 - m) < q_{уд}$  – интенсивность накопления тепла газовой средой меньше интенсивности потерь –  $T_{п}$  уменьшается.

### 5.3. Режимы внутренних пожаров

Поскольку  $G_{г} \approx G_{в}$ , увеличение интенсивности газообмена, как следует из уравнения (5.15), должно приводить к снижению  $q_{ср}$  и, соответственно, температуры пожара. Однако величина  $G_{в}$  взаимосвязана с массовой скоростью выгорания  $v_{м}$ . Экспериментально установлено, что при стационарном газообмене  $v_{м}$  зависит от  $S_{пр} \sqrt{H}$  (рис. 5.4).

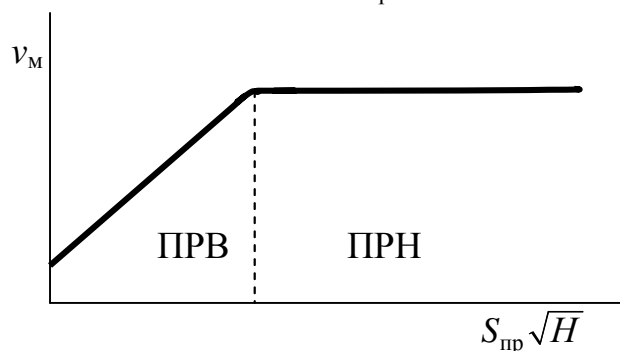


Рис. 5.4. Вид зависимости массовой скорости выгорания от проемности помещения

Если при данной проемности помещения скорость притока воздуха к поверхности горения не обеспечивает максимальную скорость выгорания, увеличение  $G_v$  (а значит, и  $G_r$ ) приводит к росту  $v_m$  и  $q_p$ . При этом  $q_{cp}$  становится больше нуля –  $T_p$  повышается. Такие пожары называются *регулируемыми вентиляцией (ПРВ)*. В тех случаях, когда массовая скорость выгорания и, следовательно, теплота пожара максимальны для данного горючего, при увеличении притока воздуха они не изменяются, т. е.  $q_p$  остается неизменной. Однако увеличение  $G_r$ , равно как и притока в помещение холодного воздуха, приводит к тому, что  $q_{cp}$  становится меньше нуля и  $T_p$  снижается (рис. 5.5). Такие пожары называются *регулируемыми нагрузкой (ПРН)*.

Таким образом, ПРН – режим пожара, при котором массовая скорость выгорания определяется характеристиками пожарной нагрузки и не зависит от изменения притока воздуха в помещение, ПРВ – режим пожара, при котором расход воздуха, поступающего в помещение, лимитирует массовую скорость выгорания.

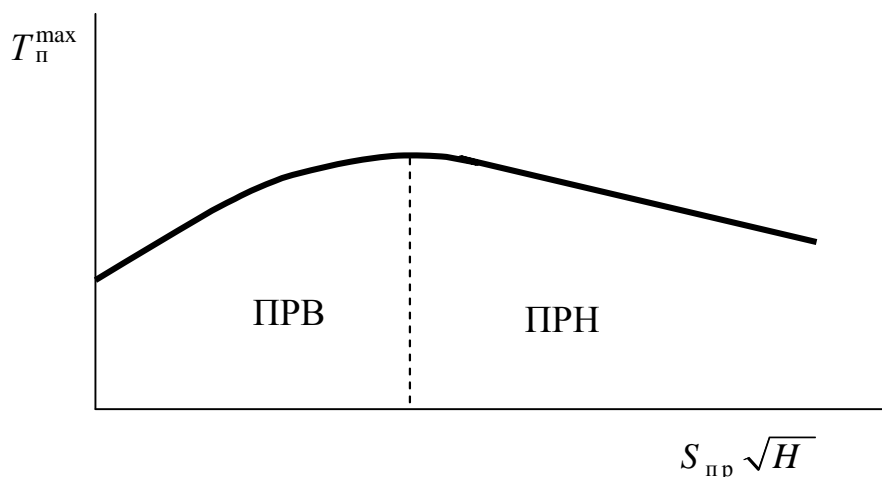


Рис. 5.5. Вид зависимости максимальной температуры пожара от проемности помещения

Как видно из рис. 5.5, в помещениях с различной проемностью может устанавливаться одинаковая среднеобъемная температура. Однако обстановка на пожаре может существенно различаться. Как правило, пожары, регулируемые вентиляцией, более опасны, чем пожары, регулируемые нагрузкой. Они протекают при недостатке воздуха. Поэтому горючие газы, выделяющиеся в результате пиролиза или испарения горючего материала, внутри помещения полностью не сгорают. Это приводит к увеличению объема пламени, выбрасываемого наружу через проем, что увеличивает опасность распространения пожара на верхние этажи здания. Следует отметить, что большую роль в этом играет форма проема – соотношение его ширины  $B$  и высоты  $H$ .

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

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

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

## 5.4. Динамика внутренних пожаров

Динамикой любого процесса, в том числе пожара, называется зависимость его параметров от времени. Знание закономерностей изменения параметров пожара необходимо для обеспечения безопасности людей, разработки мер по предотвращению распространения пожаров, для проектирования систем автоматического обнаружения и тушения, планирования сил и средств, необходимых при ликвидации пожаров.

В ходе свободного развития внутренних пожаров выделяют четыре основные стадии:

- начальную,
- развития,
- стационарную (развитую),
- затухания.

Рассмотрим изменение параметров внутренних пожаров на каждой из этих стадий.

**Начальная стадия.** Начальной считают стадию, в течение которой горение распространяется по поверхности горючих материалов. Окончанием начальной стадии считается полный охват пламенем всех предметов и материалов, находящихся в помещении. С этого момента площадь пожара становится равной площади пола, а зона горения занимает весь объем помещения.

Такой пожар называется *объемным*. Частным случаем считается так называемый *локальный* пожар, когда в силу ряда причин горение локализуется на отдельном предмете или группе предметов, а полного охвата помещения пламенем не происходит.

Если высота, на которую способен подняться восходящий газовый поток, больше высоты помещения, газы растекаются вдоль потолка, образуя припотолочный прогретый слой дыма. Достигая более холодных стен, поток охлаждается, его плотность возрастает и он опускается, создавая циркуляцию газов внутри помещения. При этом возможно задымление всего помещения, даже если нейтральная зона располагается между нижней и верхней отметками проема.

Постепенно в конвективные потоки вовлекается весь объем воздуха, находящегося в помещении, и начинают прогреваться горючие материалы, находящиеся вне зоны действия излучения очага пожара. Если температура пожара превысит температуру их воспламенения (для большинства твердых материалов 250–300 °С), скорость выделения горючих газов будет достаточна для образования в объеме помещения горючей смеси на нижнем концентрационном пределе. В случае достаточного притока воздуха пламя будет распространяться уже не по поверхности, а по объему газозвоздушной смеси со скоростью порядка 0,5 м/с и более. При этом происходит практически мгновенный охват пламенем всего помещения – *общая вспышка*.

После этого площадь пожара становится равной площади помещения, зона горения занимает объем всего помещения, соответственно, пожар принимает форму *объемного*.

Во время общей вспышки происходит воспламенение бедной газозвоздушной смеси, что сопровождается резким ростом давления. Стекла закрытых окон выпадают наружу и разрушаются в результате удара о твердую поверхность. Однако давление взрыва такой смеси, как правило, невелико, более массивные и прочные конструкции (двери, стеклопакеты) могут оставаться целыми.

Если в результате общей вспышки площадь вскрытых проемов увеличивается, ПРД поднимается и расход воздуха  $G_v$ , поступающего в помещение, возрастает. В первый момент это практически всегда приводит к некоторому понижению температуры пожара вследствие разбавления газовой среды в помещении более холодным воздухом. Дальнейшее изменение температуры зависит от режима пожара: при ПРН она несколько снижается или не изменяется, при ПРВ – продолжает расти.

Начальная стадия далеко не всегда заканчивается общей вспышкой. Для этого интенсивность накопления тепла газовой средой  $q_{cp}$  в помещении

должна быть достаточной для ее прогрева до температуры воспламенения горючей нагрузки  $T_{\text{воспл}}$ , и концентрация кислорода в газовой среде должна быть минимально необходимой для образования горючей смеси.

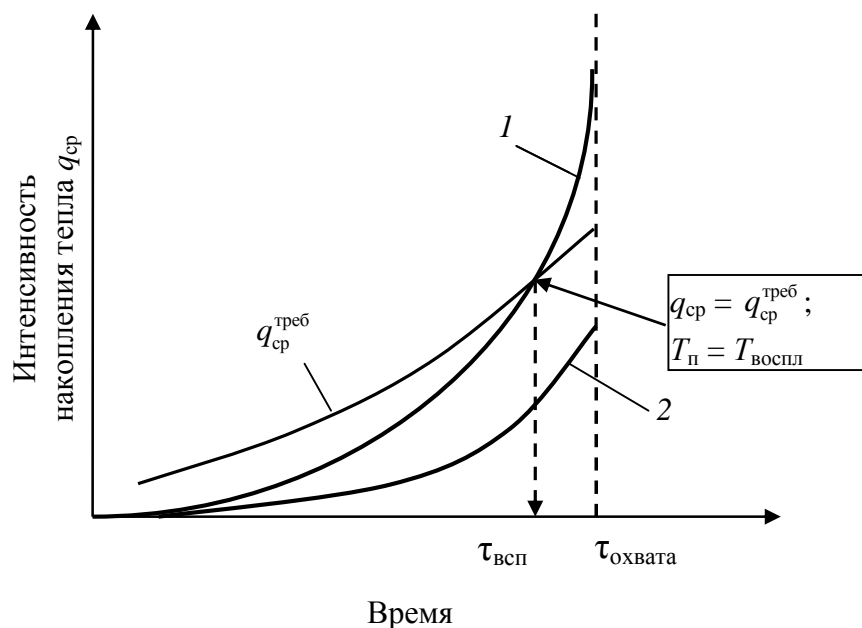


Рис. 5.6. Иллюстрация теплового условия общей вспышки:

1 и 2 – динамика изменения  $q_{cp}$  при данных условиях теплогазообмена (см. уравнение (5.15));  $q_{cp}^{\text{треб}}$  – интенсивность накопления тепла газовой средой, требуемая для ее прогрева до  $T_{\text{воспл}}$ ;  $\tau_{\text{воспл}}$  – время вспышки;  $\tau_{\text{охвата}}$  – время охвата пламенем всей поверхности горючей нагрузки (окончание начальной стадии)

Как видно из рис. 5.6, общая вспышка может произойти в момент пересечения кривых 1 и  $q_{cp}^{\text{треб}}$ . Если динамика накопления тепла газовой средой описывается кривой 2, начальная стадия протекает при постепенном росте площади пожара до момента охвата всей поверхности горючей нагрузки.

Условие прогрева газовой среды в помещении до  $T_{\text{воспл}}$  является необходимым, но недостаточным для общей вспышки. Рост площади пожара сопровождается уменьшением коэффициента избытка воздуха. Подставив выражения (5.2) и (5.12) в формулу (5.1), получим:

$$\alpha = \frac{0,61S_{\text{пр}}\sqrt{H_{\text{пр}}}}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}S_{\Pi}V_{\text{в}}^0\rho_{\text{в}}}. \quad (5.16)$$

Из этой формулы следует, что, если проемность помещения не изменяется, коэффициент избытка воздуха обратно пропорционален площади пожара, так как остальные ее члены для данного случая являются константами.

Объединив постоянные величины условным коэффициентом  $A$ , запишем выражение (5.16) в виде

$$\alpha = A / S_{\Pi}. \quad (5.17)$$

Для пламенного горения коэффициент избытка воздуха может быть выражен через концентрацию кислорода в газообразных продуктах:

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}. \quad (5.18)$$

При снижении концентрации кислорода до некоторого предельного значения пламенное горение прекращается. Так как для большинства ТГМ эта концентрация составляет примерно 13 % об., из формулы (5.18) следует, что гомогенное горение прекращается при  $\alpha \leq 2,6$ . Следовательно, при некотором значении площади пожара  $S_{\Pi}^{\text{пред}} \approx A / 2,6$  распространение пожара должно прекратиться и, если не возрастет приток воздуха (например, за счет вскрытия еще одного проема, что приведет к росту коэффициента  $A$ ), общая вспышка не произойдет.

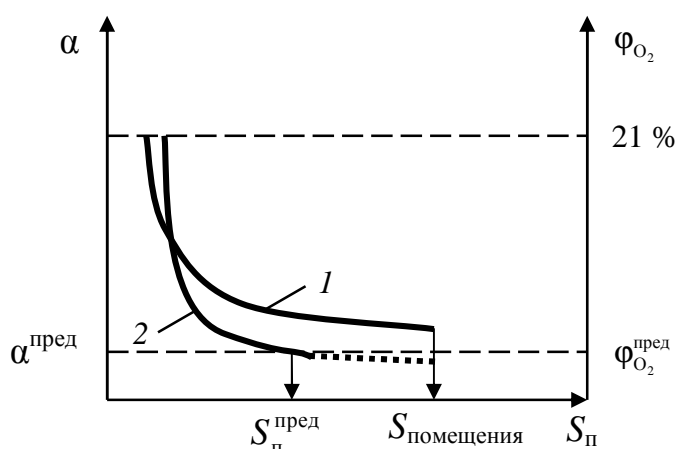


Рис. 5.7. Изменение коэффициента избытка воздуха и концентрации кислорода с ростом площади пожара:

- 1 – распространение пожара при  $\alpha > \alpha^{\text{пред}}$  и  $T_{\Pi} \geq T_{\text{воспл}}$  – происходит общая вспышка;  
 2 – при  $\alpha = \alpha^{\text{пред}}$  и  $S_{\Pi} = S_{\Pi}^{\text{пред}}$  – общая вспышка не наступает без дополнительного притока воздуха

Иллюстрация данного (достаточного) условия приведена на рис. 5.7. Если параметры газообмена складываются согласно кривой 1, общая вспышка может произойти при  $T_{\Pi} \geq T_{\text{воспл}}$ . При  $T_{\Pi} < T_{\text{воспл}}$  время охвата помещения пожаром ( $S_{\Pi} = S_{\text{помещения}}$ ) зависит от скорости распространения пламени по поверхности горючей нагрузки.

При возникновении очага горения ситуация часто складывается так, что в результате теплового расширения давление во всех точках в помещении оказывается выше атмосферного и через все проемы, щели и т. п. газ выдавливается наружу. При этом газовая среда по среднеобъемному составу мало отличается от воздуха (рис. 5.8, а); скорость распространения пожара такая же, как на открытом пространстве. Продолжительность такого состояния зависит от мощности первичного очага, объема и проемности помещения.

По мере развития процесса горения относительное положение эпюр давления изменяется, ПРД поднимается и начинается газообмен помещения с наружной средой (рис. 5.8, б). При этом в потоке удаляемых газов начинают преобладать продукты горения, коэффициент избытка воздуха падает (рис. 5.8, в).

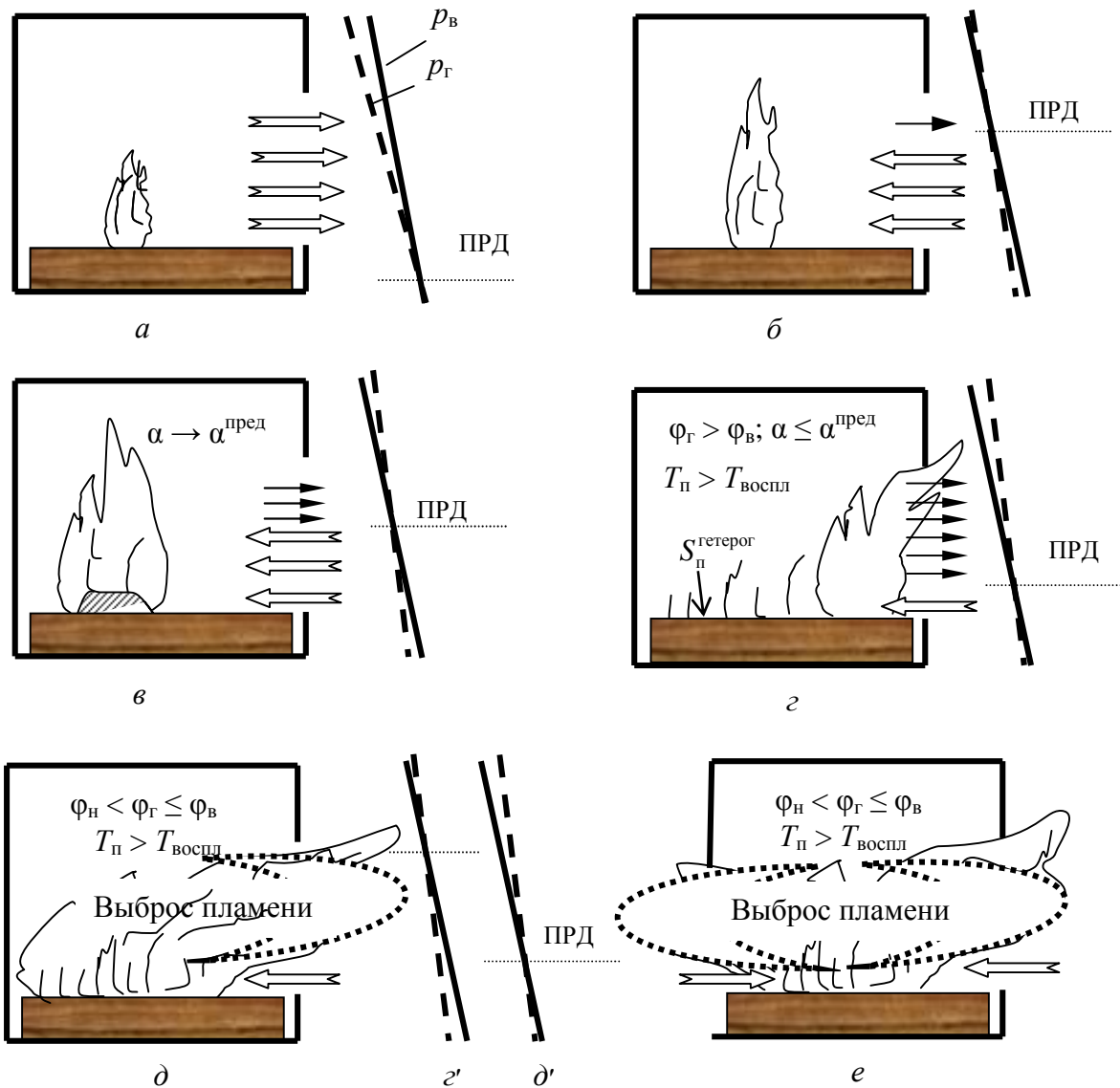


Рис. 5.8. Динамика газообмена на начальной стадии:

$\varphi_r$  – концентрация горючих газов;  $\varphi_n$  – НКПРП;  $\varphi_v$  – ВКПРП; белые стрелки – поток воздуха, черные – поток удаляемых газов; сплошная и пунктирные прямые линии – эпюры давления атмосферного воздуха и газовой среды соответственно

Численный эксперимент по оценке влияния газообмена на продолжительность начальной стадии [16] показал, что при площади открытого проема менее 0,5 % от площади помещения тепловое расширение воздуха и дымовые газы запирают проем и он работает только «на выход».



Если значение коэффициента избытка воздуха падает до  $\alpha^{\text{пред}}$  и температура газовой среды не успела достичь  $T_{\text{воспл}}$ , общая вспышка не происходит (см. рис. 5.7, кривая 2). Однако это не означает, что дальнейшее развитие и затухание пожара будет происходить при неизменной площади. В помещениях с открытыми проемами снижение коэффициента избытка воздуха до предельного значения, как правило, приводит к разделению зоны горения на два вида – гомогенного и гетерогенного (рис. 5.8, з). В этом случае скорость распространения пожара резко уменьшается, так как площадь зоны пламенного горения лимитируется притоком воздуха и остается неизменной, а общая площадь пожара увеличивается за счет роста площади гетерогенного горения. Как правило, температура пожара к этому времени успевает превысить  $T_{\text{воспл}}$  и в помещении накапливаются газы, не сгоревшие из-за недостатка кислорода. Их концентрация  $\varphi_{\text{г}}$  может превысить верхний концентрационный предел распространения пламени  $\varphi_{\text{в}}$  (см. рис. 5.8, з).

На практике наиболее часто встречаются следующие сценарии развития данной ситуации. *Первый* – постепенное распространение пожара на всю площадь помещения (см. рис. 5.7, кривая 2). *Второй* – уменьшение массовой скорости выгорания при переходе в гетерогенный режим горения приводит к понижению давления внутри помещения, эпюра давлений газов смещается, через проемы (щели и т. п.), оказавшиеся ниже ПРД, в помещение поступает воздух (рис. 5.8, з'). Если концентрация горючих газов к этому времени превысила  $\varphi_{\text{в}}$ , то разбавление смеси газов внутри помещения может вызвать образование и воспламенение в объеме помещения горючей смеси, что сопровождается выбросом пламени через имеющийся проем (рис. 5.8, д). Данное явление называется *объемной вспышкой*. Опыт показывает, что такая самопроизвольная объемная вспышка может происходить неоднократно. *Третий сценарий* (рис. 5.8, е) часто реализуется при вскрытии проемов, организации дымоудаления. В данном случае происходит резкий сброс давления, в помещение поступает воздух, что приводит к образованию и воспламенению горючей смеси над всей поверхностью горения и объемной вспышке.

В практике пожаротушения отмечены также случаи, когда объемная вспышка происходила через некоторое время после начала подачи воды. Характерными для всех этих случаев являлись высокая температура пожара и невозможность подачи воды на поверхность горения непосредственно. Очевидно, образующийся водяной пар сначала понижает ПРД и запирает проем, прекращая тем самым приток воздуха. Так как площадь тушения меньше площади поверхности горения, в помещении продолжается пиролиз и образование горючих газов, хотя и с меньшей скоростью. При высокой среднеобъемной температуре водяной пар скапливается под потолком.

Это уменьшает объем газовой смеси и, соответственно, повышает в ней концентрацию горючих газов. Затем водяной пар начинает конденсироваться, что вызывает снижение давления, подъем ПРД и приток воздуха в помещение. Если в результате разбавления воздухом сконцентрированные горючие газы попадают в область воспламенения, происходит объемная вспышка.

Из всего изложенного выше следует, что процессы горения, газо- и теплообмена на начальной стадии имеют вероятностный характер. Соответственно, вероятностным является и характер окончания начальной стадии.

**Стадия развития.** Это период времени от полного охвата пламенем поверхности горючей нагрузки до установления максимальной массовой скорости ее выгорания. На данной стадии интенсивность аккумуляции тепла газовой средой  $q_{\text{ср}}$  намного выше интенсивности теплопотерь  $q_{\text{уд}}$  (см. выражение (5.15)), что вызывает быстрый рост температуры пожара. Соответственно этому изменяются параметры тепло- и газообмена.

**Стационарная (развитая) стадия.** Этот период является продолжением стадии развития и характеризуется постоянством значений параметров процессов горения, тепло- и газообмена.

**Стадия затухания.** Эта стадия начинается с момента уменьшения скорости выгорания горючей нагрузки и заканчивается моментом достижения исходного значения температуры пожара.

При решении практических задач обычно принимается, что горючая нагрузка из твердых материалов распределена по всей площади пола равномерно; жидкость может находиться как в емкости, так и быть разлитой по всему полу. Соответственно, пожар ТГМ после начальной стадии считается объемным; пожар ЛВЖ и ГЖ может быть как объемным, так и локальным.

Для определения режима объемного пожара (то есть на стадии развития и стационарной стадии) разработан ряд методик. Так, для случая горения штабелей целлюлозосодержащих материалов применима [5, 16] следующая формула:

$$\Phi = \frac{\rho_{\text{в}} \sqrt{g} S_{\text{пр}} \sqrt{H_{\text{пр}}}}{S_{\text{п.г}}}, \quad (5.19)$$

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

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

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

$H_{\text{пр}}$  – высота проема, м<sup>2</sup>;

$S_{\text{п.г}}$  – площадь поверхности горения, м<sup>2</sup>.

Если  $\Phi < 0,253$ , объемный пожар будет развиваться и протекать в режиме ПРВ; если  $\Phi > 0,29$  – в режиме ПРН. При промежуточных значениях числа  $\Phi$  в помещении будет переходный режим.

Данная формула справедлива для помещений, форма которых близка к кубической. Кроме того, ее сложно применить для разнородной горючей нагрузки, когда неизвестна площадь поверхности горения.

Определение режима пожара при горении разнородной горючей нагрузки, согласно ГОСТ Р 12.3.047–98 «ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Приложение К», рекомендуется проводить по методике, разработанной ВНИИПО. Она заключается в следующем (обозначения параметров приводятся согласно ГОСТ):

1. По проектной документации или данным натурного обследования помещения определяется его объем  $V$ , м<sup>3</sup>; площадь  $A_i$ , м<sup>2</sup>, и высота  $h_i$ , м, каждого  $i$ -го проема; масса  $i$ -го материала горючей нагрузки  $P_i$ , кг. Из справочной литературы находят теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг каждого  $i$ -го материала горючей нагрузки  $V_{0i}$ , м<sup>3</sup>/кг; его низшую теплоту сгорания  $Q_{ni}$ , МДж/кг.

2. Рассчитываются следующие исходные данные.

Проемность исследуемого помещения  $\Pi$ , м<sup>0,5</sup>:

$$\text{при } V \leq 1000 \text{ м}^3 \quad \Pi = \sum A_i h_i^{0,5} / V^{0,667}, \quad (5.20)$$

$$\text{при } V > 1000 \text{ м}^3 \quad \Pi = \sum A_i h_i^{0,5} / S, \quad (5.21)$$

где  $S$  – площадь пола исследуемого помещения, м<sup>2</sup>.

Объем воздуха  $V_0$ , м<sup>3</sup>, необходимый для сгорания 1 кг горючей нагрузки:

$$V_0 = \sum V_{0i} P_i / \sum P_i. \quad (5.22)$$

3. Для помещения кубической формы, объем которого равен объему исследуемого помещения, вычисляются:

– удельная горючая нагрузка  $g_k$ , кг/м<sup>2</sup>, в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади всех тепловоспринимающих конструкций (стены, пол, потолок):

$$g_k = \frac{\sum P_i Q_{ni}}{(6S - A) Q_{н.др}}, \quad (5.23)$$

где  $S$  – площадь пола, равная  $V^{0,667}$ ;

$Q_{н.др}$  – низшая теплота сгорания древесины, МДж/кг;

– критическая горючая нагрузка  $g_{к.кр}$ , кг/м<sup>2</sup>, в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади всех тепловоспринимающих конструкций:

$$g_{к.кр} = \frac{4500 \Pi^3}{1 + 500 \Pi^3} + \frac{V^{0,333}}{6V_0}. \quad (5.24)$$

4. Сравниваются значения  $g_k$  и  $g_{к.кр}$ .

Если  $g_k < g_{к.кр}$  – в помещении будет пожар, регулируемый нагрузкой (ПРН), если  $g_k > g_{к.кр}$  – в помещении будет пожар, регулируемый вентиляцией (ПРВ).

## Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения газообмена помещения очага пожара с внешней средой.
2. Как изменяется положение нейтральной зоны в плоскости проема при повышении (понижении) температуры пожара?
3. Дайте определение режимам пожара.
4. Какие возможны последствия увеличения притока воздуха в помещение очага пожара?
5. Дайте определения основным стадиям внутреннего пожара.
6. В чем заключается механизм общей вспышки? При каких условиях она происходит?
7. В чем заключается механизм объемной вспышки? При каких условиях она происходит?

## 6. Прекращение горения на пожаре

---

### 6.1. Тепловая теория прекращения горения

Процесс тушения пожара – это комплекс управленческих решений, направленных на обеспечение безопасности людей, животных, спасение материальных ценностей и ликвидацию горения.

Исходя из этого, работа на пожаре всегда ведется сразу по нескольким направлениям: спасание людей, сохранение материальных ценностей, развертывание сил и средств, вскрытие и разборка конструкций и собственно прекращение горения. В рамках дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» рассматривается только одна составляющая тушения пожара – прекращение горения, общие принципы, пути и способы достижения этой цели. Важность понимания этих вопросов обусловлена тем, что на пожаре основным процессом является процесс горения. Нет процесса горения – нет и пожара. Поэтому прекращение горения во всех его видах означает ликвидацию пожара.

При рассмотрении вопросов, связанных с возникновением и прекращением горения, используют понятие классического «треугольника горения». Процесс горения возникает и развивается, когда во времени и пространстве сходятся: горючее вещество (ГВ), источник зажигания (ИЗ) и окислитель (ОК) (рис. 6.1). Если разорвать любую связь или исключить один из элементов данной схемы, горение станет невозможным.

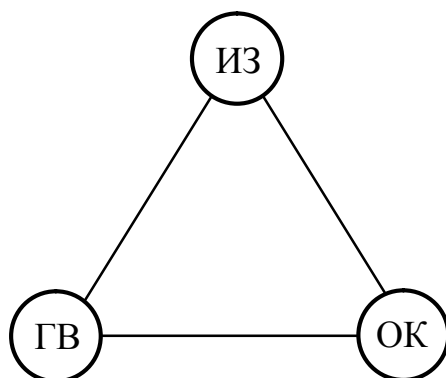


Рис. 6.1. Схема «треугольника горения»

Пламенное горение на пожаре является диффузионным и гомогенным. При этом газообразное горючее непрерывно поступает в зону горения, смешивается с газообразным окислителем и воспламеняется от источника зажигания. На пожаре таким непрерывно действующим источником зажигания является само пламя. Следовательно, ликвидация факела пламени означает исключение из «треугольника горения» одного угла – источника зажигания и является условием, необходимым для прекращения горения. Однако выполнения только этого условия не всегда достаточно для тушения пожара. Так, при горении многих твердых, склонных к тлению материалов (древесно-стружечные плиты, древесина, ткани, органические волокна и т. д.) температура поверхности составляет 600–700 °С, что вполне достаточно для зажигания выделяющихся газообразных продуктов пиролиза и при отсутствии пламени. В таких случаях достаточным условием для тушения пожара является прекращение поступления горючих газов в зону горения, т. е. ликвидация еще одного угла треугольника пожара – горючего вещества.

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

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{ад}} - \Delta T, \quad (6.1)$$

где  $T_{\text{ад}}$  – адиабатическая температура горения;  
 $\Delta T$  – изменение температуры.

Подобное явление наблюдается в первую очередь для смесей заранее перемешанных газов (кинетических смесей), для которых существуют пределы распространения пламени, обусловленные тепловыми потерями от зоны горения в стенки сосуда и на излучение. Из-за тепловых потерь снижается температура пламени и уменьшается скорость его распространения. Снижение скорости приводит к тому, что тепловые потери увеличиваются еще больше, температура пламени прогрессирующе падает и т. д. Критическое условие возможности горения характеризуется предельной величиной, на которую может понизиться температура пламени. Если тепловые потери приводят к снижению температуры пламени на величину, большую чем  $RT_{\text{ад}}^2 / E$ , то происходит его потухание (здесь  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $E$  – энергия активации реакции). Эта величина получила наименование «*характеристический интервал*».

Однако на пожарах горение является не кинетическим, а диффузионным. В диффузионном пламени уменьшение температуры не приводит к значительному изменению количества газа, сгорающего на единице его поверхности, поскольку скорость горения определяется скоростью диффузии. Поэтому срыв горения из-за теплопотерь осуществляется в диффузионном пламени при меньшей интенсивности горения по сравнению с пламенем в смеси заранее перемешанных газов, да и природа критического условия иная.

Проинтегрировав уравнения диффузии и теплопроводности, используя уравнение скорости химической реакции и теорию размерности, Я. Б. Зельдович получил максимально возможную величину снижения температуры диффузионного пламени, при которой наступает потухание:

$$T_{\text{ад}} - T_{\text{пот}} \approx \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E}, \quad (6.2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,32 кДж/моль;

$T_{\text{ад}}$  – адиабатическая температура пламени,  $\approx 2300$  К;

$E$  – энергия активации,  $\approx 126000$  кДж/моль.

Выразив отсюда собственно температуру потухания и подставив численные значения входящих величин, можно оценить значение этой критической температуры пламени:

$$T_{\text{пот}} \approx T_{\text{ад}} - \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E} \approx 2300 - \frac{3 \cdot 8,32 \cdot 2300^2}{126000} \approx 1250 \text{ К.}$$

То есть адиабатическая температура потухания пламени составляет около 1000 °С.

На практике же в зоне горения реализуется не адиабатическая, а действительная температура горения. Она существенно ниже адиабатической вследствие потерь тепла, связанных сразу с несколькими физико-химическими процессами.

Во-первых, у диффузионных пламен выше светимость из-за наличия в них твердых частиц углерода (сажи), которые не успевают сгорать до СО и СО<sub>2</sub> из-за недостатка кислорода. Во-вторых, диффузионные пламена имеют более протяженную зону реакции и, соответственно, большую поверхность излучения и меньшую интенсивность тепловыделения в расчете на единицу объема. В-третьих, при диффузионном горении на величину тепловых потерь от факела пламени существенно влияет конвективный теплообмен с окружающим пространством. В сумме эти потери для диффузионных пламен составляют до 40 % от всего тепла, выделяющегося в зоне горения.

При реализации процесса тушения в зоне реакции резко снижаются потери на излучение (ниже 1000 °С частицы углерода уже практически не светятся, а значит, и не излучают), уменьшается и конвективный теплообмен с окружающим пространством. Это позволяет нам считать, что

на температурах, близких к температурам потухания, процесс горения действительно крайне близок по своим характеристикам к адиабатически-изобарическому и полученное расчетным методом значение температуры потухания реализуется на практике.

Таким образом, тепловая теория потухания дает удобный инструмент для физического обоснования способов и средств прекращения горения на пожаре.

## 6.2. Способы достижения температуры потухания

Согласно тепловой теории потухания задача прекращения пламенного горения сводится к снижению температуры в зоне химических реакций до температуры потухания. Это достигается путем нарушения теплового равновесия в зоне протекания химических реакций горения, т. е. нарушения баланса процессов тепловыделения и теплоотвода.

Аналитически зависимость интенсивности тепловыделения в единице объема  $q^+$  от вида горючего, состава горючей смеси и температуры описывается уравнением вида:

$$q^+ = Q_n k_0 \varphi_{\Gamma}^n \varphi_{\text{ок}}^m \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (6.3)$$

где  $Q_n$  – низшая теплота сгорания горючего;  
 $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  
 $\varphi_{\Gamma}$  и  $\varphi_{\text{ок}}$  – концентрация горючего и окислителя, соответственно;  
 $n$  и  $m$  – порядок реакции по горючему и окислителю, соответственно;  
 $E$  – энергия активации;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура.

Интенсивность процесса теплоотвода от фронта пламени  $q^-$  излучением и конвекцией в расчете на единицу объема описывается уравнением:

$$q^- = \varepsilon \sigma \frac{S}{V} (T_{\text{пл}}^4 - T_0^4) + \alpha \frac{S}{V} (T_{\text{пл}} - T_0), \quad (6.4)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты пламени;  
 $\sigma$  – константа Стефана – Больцмана;  
 $S$  – площадь поверхности теплообмена;  
 $V$  – объем зоны горения;  
 $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  
 $T_{\text{пл}}$  – температура пламени;  
 $T_0$  – начальная температура.



Используя понятие приведенного коэффициента теплопередачи, уравнение (6.4) можно переписать в виде:

$$q^- = \alpha_{\text{пр}} \frac{S}{V} (T_{\text{пл}} - T_0), \quad (6.5)$$

где  $\alpha_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплопередачи.

Графики зависимостей  $q^+$  и  $q^-$  от температуры показаны на рис. 6.2.

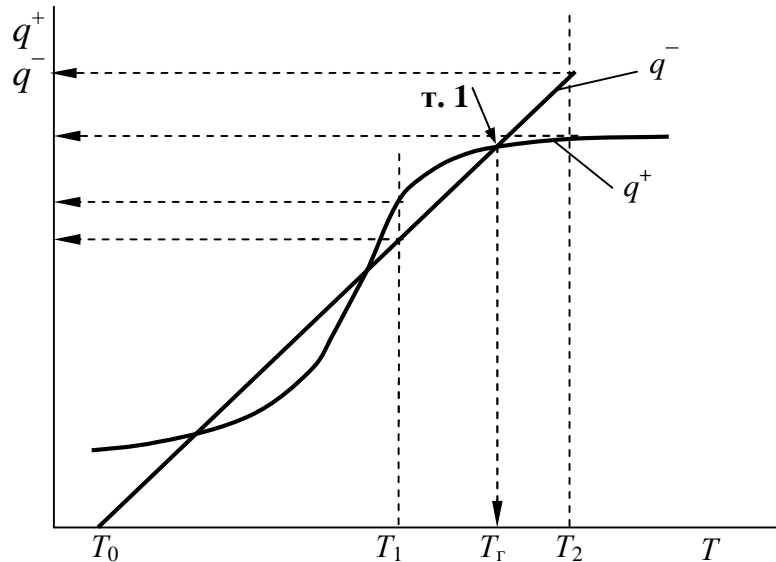


Рис. 6.2. Зависимость интенсивности тепловыделения и теплоотвода в зоне горения от температуры

Проекция точки пересечения графиков (т. 1) на ось абсцисс соответствует температуре диффузионного пламени  $T_r$ . В этой точке  $q^+ = q^-$  – процесс горения является устойчивым.

Рассмотрим причину устойчивости. Допустим, что в силу каких-либо причин температура понизилась до  $T_1$ , а законы тепловыделения и теплоотвода не изменились (то есть взаимное расположение графиков  $q^+$  и  $q^-$  осталось прежним). Из рис. 6.2 видно, что в этом случае интенсивность тепловыделения станет больше интенсивности теплоотвода. Следовательно, система будет нагреваться более интенсивно, чем охлаждаться, и температура ее вернется к значению  $T_r$ . Если, например, по инерции температура повысится до  $T_2$ , интенсивность охлаждения  $q^-$  станет больше интенсивности тепловыделения  $q^+$ . Соответственно температура начнет понижаться, и система вновь самопроизвольно вернется в т. 1.

Из всего сказанного следует, что для прекращения процесса горения недостаточно изменить только температуру, необходимо изменить параметры процессов тепловыделения и (или) теплоотвода.

Например, изменим интенсивность теплоотвода из зоны горения путем увеличения коэффициента теплопередачи  $\alpha$  или отношения  $S / V$ . Графически это выразится в увеличении угла наклона прямой. Если степень изменения такова, что в итоге система перейдет в состояние, показанное на рис. 6.3, любое незначительное изменение температуры приведет к тому, что интенсивность теплоотвода станет больше интенсивности тепловыделения, т. е. процесс горения станет невозможным. Температура, соответствующая  $t. 2$ , и является температурой потухания.

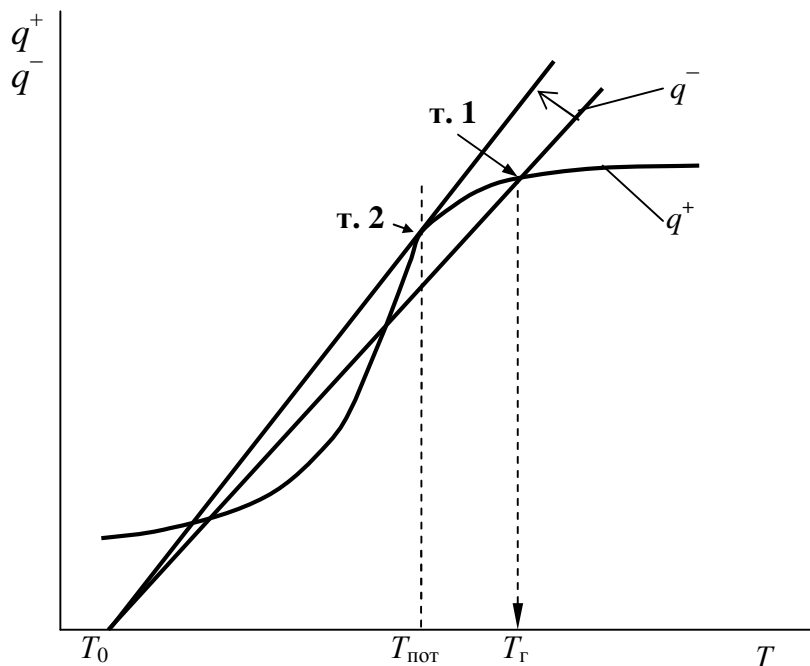


Рис. 6.3. Схема достижения температуры потухания увеличением интенсивности теплоотвода в зоне горения

Перевести систему в состояние, характеризуемое  $t. 2$ , можно также путем воздействия на химическую реакцию горения, т. е. снижением интенсивности тепловыделения (рис. 6.4).

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

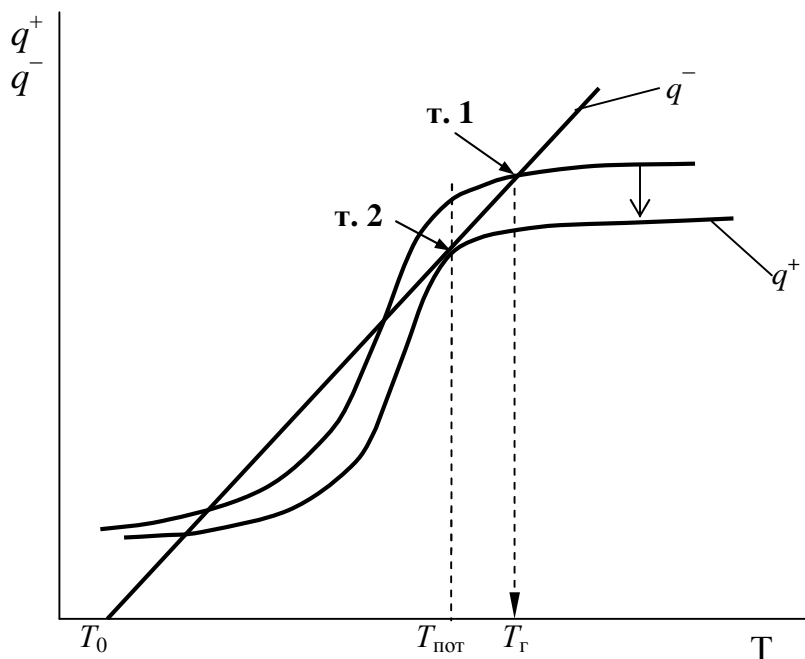


Рис. 6.4. Схема достижения температуры потухания уменьшением интенсивности тепловыделения в зоне горения

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

### 6.3. Физико-химические способы прекращения горения на пожаре

Физико-химические способы воздействия на интенсивность тепловыделения  $q^+$  и охлаждения  $q^-$  вытекают из анализа уравнений, которые описывают процессы тепловыделения и теплоотвода. Действительно, из параметров, которые определяют интенсивность тепловыделения, мы можем эффективно влиять на концентрации реагирующих веществ  $\varphi_{\Gamma}$  и  $\varphi_{\text{ок}}$ , а также на  $k_0$  и  $E$ . Реально повлиять на интенсивность теплоотвода можно путем увеличения коэффициента теплопередачи, удельной поверхности теплообмена, а также степени черноты пламени.

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

Способы снижения интенсивности тепловыделения:

### **1. Уменьшение концентрации горючего $\phi_r$ в зоне горения.**

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

Одним из частных способов прекращения доступа горючего в зону горения, который осуществляется только техническими средствами, без применения огнетушащих веществ, является тушение пожаров на резервуарах с горючей жидкостью методом ее перемешивания. Рассмотрим подробно этот метод.

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

Такой способ прекращения горения может быть достаточно эффективен при тушении резервуаров с нефтепродуктами, если начальная (до пожара) температура жидкости ниже температуры ее воспламенения. Способ был предложен еще в 1903 г. русским инженером А. Г. Лораном. Большие теоретические и экспериментальные исследования были проведены в 50-х годах XX века. Их результаты обобщены в монографии В. И. Блинова и Г. Н. Худякова.

Тушение пламени возможно и переобогащением горючей смеси в зоне реакции, т. е. более интенсивной подачей горючего в зону реакции горения. Но так как на пожарах, как правило, доступ окислителя в зону реакции горения очень велик и трудно регулируем, то увеличение интенсивности подачи горючего не приведет к переобогащению смеси и тушению пожара, а, наоборот, интенсифицирует процесс горения за счет увеличения размеров факела пламени. Переобогащением возможно тушение пламени лишь в замкнутых объемах с сильно ограниченным доступом воздуха.

## **2. Уменьшение концентрации окислителя $\varphi_{ок}$ в зоне горения.**

Этим способом пользуются тогда, когда есть реальная практическая возможность снизить интенсивность подачи воздуха в зону горения, например, при тушении пожаров в подвалах, туннелях, шахтах, трюмах и т. п. Для этого используют как некоторые огнетушащие вещества (пены средней и высокой кратности), так и специальные конструктивные решения (герметизация отсеков на подводных лодках и т. п.).

При обеднении зоны горения окислителем (или относительном переобогащении ее горючим) интенсивность горения снижается – пламя гаснет. Это объясняется тем, что скорость реакции (а стало быть, и интенсивность тепловыделения, и температура пламени, и скорость распространения пламени) имеет максимальное значение лишь в области стехиометрических концентраций. Они уменьшаются как при обеднении, так и при обогащении смеси.

При достижении предельных значений на верхнем или нижнем пределе температура в зоне протекания реакции горения понижается до температуры потухания пламени – горение прекращается.

Однако в некоторых случаях на практике тушение переобогащением может вызвать объемную вспышку (взрыв), так как при последующем обязательном вентилировании помещения концентрация горючих компонентов в смеси снова перемещается в область воспламенения.

## **3. Разбавление смеси путем введения нейтральных газов.**

Очень распространенный способ тушения, объединяющий по своему механизму два предыдущих, так как в этом случае в зоне горения происходит снижение концентраций и горючего и окислителя, что значительно снижает скорость тепловыделения и в конечном счете приводит к прекращению пламенного горения.

## **4. Торможение реакции путем введения химически активных ингибиторов.**

В этом случае резкое снижение скорости тепловыделения происходит вследствие взаимодействия ингибиторов с активными центрами самой реакции горения, т. е. влияние оказывается на предэкспоненциальный коэффициент  $k_0$  и энергию активации реакции  $E$  (формула (6.3)), что и приводит в дальнейшем к прекращению горения.

## **5. Снижение давления в зоне реакции.**

Этот механизм практически не находит применения на практике, так как в большинстве случаев реакция горения на пожарах протекает при близком к атмосферному давлении окружающей среды и повлиять на него невозможно. Однако в некоторых частных случаях он мог бы быть реализован.

Физико-химический механизм этого способа проявляется в том, что скорость химической реакции, определяющая интенсивность тепловыделения

в зоне реакций, зависит от числа эффективных соударений молекул горючего с молекулами окислителя. А количество соударений прямо пропорционально количеству самих молекул в единице объема зоны реакции.

В физике горения известны не только концентрационные пределы горения, но и пределы горения по давлению. Для большинства углеводородных горючих веществ нижний предел близок к 10 кПа. В специальных условиях удается поддерживать горение и при значительно более низких давлениях, почти до 0,1 кПа. Для прекращения диффузионного горения, какое бывает при пожарах, вполне достаточным было бы понижение давления даже на 0,04–0,05 кПа. При таком разрежении интенсивность тепловыделения резко снизится, температура в зоне реакции понизится до  $T_{\text{пот}}$  – и горение прекратится. Таким способом можно прекратить горение в некоторых технологических установках и аппаратах, при пожарах в кабинах пилотов самолетов и космических кораблей.

Повысить интенсивность теплоотвода можно следующими способами:

### **1. Увеличение коэффициента теплопередачи от зоны горения.**

При этом воздействие оказывается на приведенный коэффициент теплопередачи  $\alpha_{\text{пр}}$  (формула (6.5)).

Этот механизм может быть реализован путем:

- введения в зону горения теплоемких компонентов;
- введения в зону реакции веществ с большой теплотой фазового перехода.

То есть реализуется этот эффект только при использовании некоторых огнетушащих веществ и находит достаточно широкое применение на практике. В самых простых случаях это может быть и засыпание очага возгорания песком, подача в зону горения огнетушащих порошков и даже распыленной воды, которая реализует значительный теплоотвод именно в момент испарения – фазового перехода из жидкости в пар.

### **2. Увеличение удельной поверхности теплоотвода $S / V$ .**

На практике это можно реализовать введением в зону горения дисперсных веществ с большой удельной поверхностью; как наиболее распространенное средство в таком качестве применяют огнетушащие порошки. Аналогичное воздействие оказывают и специальные технические устройства, например сетчатые огнепреградители, которые находят широкое применение в объемах технологических установок, при защите вентиляционных и технологических трубопроводов и т. д.

### **3. Резкая интенсификация теплоотвода повышением коэффициента черноты излучающих сред в зоне реакции.**

Данный механизм достаточно редко реализуется на практике. При горении некоторых веществ (например, водорода, магния) температура пламени очень высока и, в соответствии с законом Стефана – Больцмана, количество отводимого из зоны горения тепла должно быть очень велико.

Однако пламена этих веществ, как правило, бесцветны и их коэффициент черноты очень низок. Поэтому теплотери излучением из зоны реакции не так велики.

Введение специальных добавок в пламя, которые повысили бы ее излучающую способность, привело бы к резкому увеличению интенсивности теплоотвода из зоны реакции, что, в свою очередь, привело бы к быстрому прекращению процесса горения.

Единственный случай, когда этот механизм реализуется на практике – это тушение пожаров металлов и их соединений специальными огнетушащими порошками (класса D) на основе порошкообразного графита. При этом сам углерод (графит) хоть и является горючим веществом, в полной мере реализует свою способность светиться в зоне высоких температур. Это повышает излучательную способность пламени и, соответственно, теплотери на излучение. Эти теплотери, сочетаясь с охлаждающим механизмом действия самого порошка, и приводят в конечном счете к снижению температуры в зоне реакции до температуры потухания.

#### **6.4. Классификация огнетушащих веществ. Условия, необходимые и достаточные для прекращения горения**

Каждое вещество, применяемое для прекращения горения, обладает определенным набором механизмов огнетушащего действия. При этом какой-то один механизм является доминирующим. Традиционно огнетушащие вещества делят на:

- охлаждающие,
- изолирующие,
- разбавляющие,
- ингибирующие.

Эта классификация сложилась в те времена, когда для тушения пожаров применялись в основном вода, пены, диоксид углерода и несколько хладонов (фреонов). В нее не вписываются современные огнетушащие вещества, такие как порошковые и аэрозолеобразующие составы, перегретая вода, у которых наблюдаются сразу несколько равновыраженных механизмов огнетушащего действия.

Действие любого огнетушащего вещества сводится, прямо или косвенно, к понижению температуры пламени до температуры потухания, т. е. к охлаждению зоны горения. При этом одни из них воздействуют главным

образом на процессы, протекающие *непосредственно в объеме зоны горения*, и практически не затрагивают поверхность конденсированного горючего. Это вещества, применяемые в газо- и парообразном состоянии (нейтральные газы, химически активные ингибиторы), аэрозоли и т. д.

Другие огнетушащие вещества оказывают *косвенное воздействие* на процессы, протекающие в газовой фазе. С их помощью уменьшают выход горючих газов путем охлаждения поверхности горючего или ее изолирования от зоны горения. Кроме того, некоторые огнетушащие вещества способны работать одновременно в газовой фазе и на поверхности горючего. Например, распыленная вода в зависимости от размера капель может: полностью испаряться в пламени, оказывая чисто объемное действие; частично испаряться в пламени, оказывая и объемное и поверхностное действие; практически не взаимодействовать с пламенем, оказывая только поверхностное действие.

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.

Как правило, на пожаре приходится иметь дело с газообразными, жидкими и твердыми горючими веществами. Их обозначают как очаги класса С, В и А соответственно.

Так, для *прекращения горения газов* необходимо и достаточно отобрать тепло непосредственно от зоны горения так, 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. При этом механизмы отбора тепла в объеме пламени зависят от применяемого огнетушащего вещества. Подавать огнетушащие вещества в зону горения можно различными техническими средствами как извне, так и вместе с потоком горючего или окислителя. Например, на тушение газового фонтана воду можно подавать извне лафетными стволами, автомобилями газоводяного тушения, а также закачкой внутрь фонтанирующей скважины. Существуют технические средства подачи в горящий газовый фонтан химически активных ингибиторов, нейтральных газов. Наиболее эффективным способом тушения пламени газового фонтана является импульсная (залповая) подача огнетушащего порошка в объем зоны горения.

Необходимым условием для *тушения 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 и 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 (газовых или аэрозолеобразующих составов).

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. Это условие является достаточным для тушения жидкостей.

Сравнение интенсивностей теплоотвода, требуемых для понижения температуры пламени жидкости до температуры потухания при разных способах подачи огнетушащего вещества, показывает, что жидкость энергетически более выгодно тушить охлаждением поверхностного слоя. Например, интенсивность теплоотвода, требуемая для охлаждения поверхности гептана с температуры кипения  $98\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры вспышки  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в 10 раз меньше, чем интенсивность теплоотвода, необходимая для достижения температуры потухания в зоне горения.

При этом выбор конкретного огнетушащего вещества зависит от его способности выполнить все условия, необходимые и достаточные для прекращения горения. Например, очевидно, что понизить температуру гептана до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  водой физически невозможно. Для этой цели в данном случае подходят жидкий азот, твердая углекислота или другие огнетушащие вещества с температурой кипения ниже  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если по каким-то причинам они недоступны, следует изолировать поверхность жидкости от зоны горения слоем пены или огнетушащего порошка. При этом сначала уменьшается скорость испарения, что приводит к понижению температуры пламени до температуры потухания в результате уменьшения концентрации горючего  $\varphi_r$  (см. уравнение (6.3)). Затем выход пара прекращается, и на какое-то время повторное воспламенение жидкости становится невозможным.

Для *тушения твердых горючих материалов* (ТГМ) необходимым условием также является ликвидация факела пламени. Однако при горении ТГМ, как правило, образуется прогретый слой значительной толщины. В этом слое накапливается тепло, запас которого может быть достаточен для продолжения выделения газов со скоростью, необходимой для образования над поверхностью горючей смеси после ликвидации пламени. В отличие от жидкостей температура поверхности ТГМ обычно достигает  $600\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является достаточным для зажигания газового потока.

Поэтому для прекращения горения ТГМ достаточным условием в общем случае является охлаждение прогретого слоя до температуры ниже температуры пиролиза. Следовательно, для тушения пожаров твердых горючих материалов обязательным является применение огнетушащих веществ поверхностного действия. При этом подача огнетушащих веществ должна быть так организована, чтобы площадь воздействия на поверхность горения была максимальной.

## 6.5. Параметры процесса тушения

К основным параметрам процесса тушения относятся:

- 1) интенсивность подачи огнетушащего вещества  $J$ ;
- 2) удельный расход огнетушащего вещества  $q_{уд}$ ;
- 3) время тушения  $\tau_t$ ;
- 4) секундный расход огнетушащего вещества  $g_{о.в}$ ;
- 5) показатель эффективности тушения  $\Pi_{э.т}$ .

Рассмотрим подробно каждый из представленных параметров.

**Интенсивность подачи** – это количество огнетушащего вещества, подаваемого в единицу времени на единицу площади пожара или объема помещения. В зависимости от вида огнетушащего вещества и способа тушения интенсивность подачи может иметь размерности: л/(м<sup>2</sup>·с), кг/(м<sup>2</sup>·с), л/(м<sup>3</sup>·с), кг/(м<sup>3</sup>·с).

Интенсивность подачи определяет интенсивность отвода тепла от зоны горения. Чем больше интенсивность отвода тепла превалирует над интенсивностью тепловыделения в зоне горения, тем быстрее прекращается процесс горения и тем меньше время тушения. Если интенсивности отвода и выделения тепла равны, время тушения равно бесконечности. На практике это означает, что процесс тушения будет продолжаться до тех пор, пока не выгорит все горючее или не кончится запас огнетушащего вещества. Такая интенсивность подачи называется *критической*  $J_{кр}$ .

Фактическая интенсивность находится как отношение суммарного секундного расхода всех стволов или приборов подачи к площади пожара:

$$J = \sum g / S_{п}, \quad (6.6)$$

где  $g$  – секундный расход ствола или прибора подачи огнетушащего вещества.

**Удельный расход** – это количество огнетушащего вещества, поданное за время тушения в расчете на единицу площади пожара или объема помещения. Соответственно, этот параметр может иметь размерности: л/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, л/м<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>.

Удельный расход зависит от интенсивности и времени подачи огнетушащего вещества:

$$q_{уд} = J\tau_t. \quad (6.7)$$

Характерные зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи показаны на рис. 6.5. График зависимости  $\tau_t$  от интенсивности подачи огнетушащего вещества называют «кривая тушения».

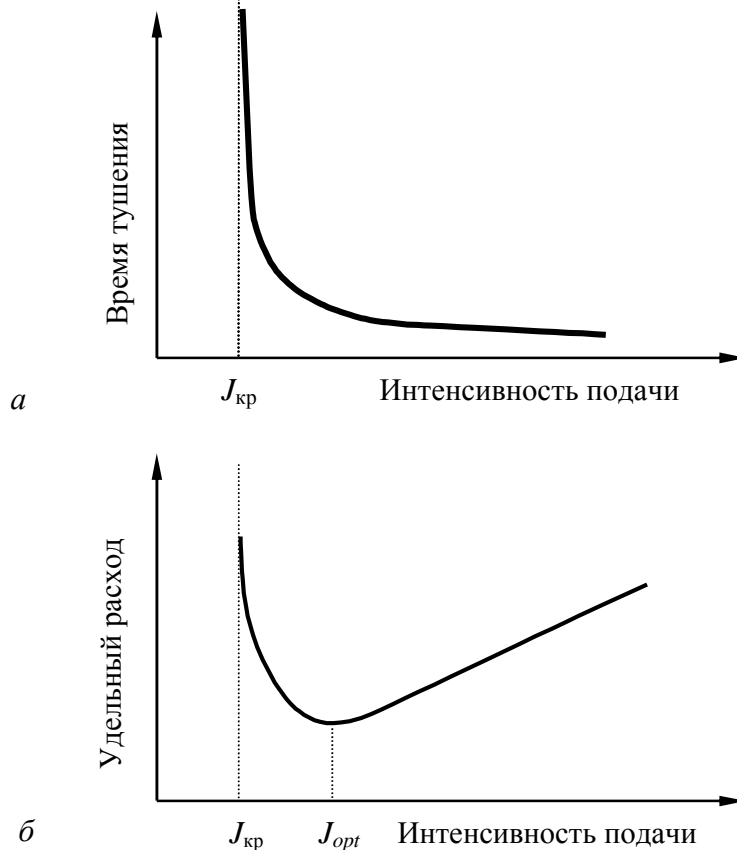


Рис. 6.5. Зависимость времени тушения (а) и удельного расхода (б) от интенсивности подачи огнетушащего вещества

**Время тушения** – это период от начала подачи огнетушащего вещества до прекращения горения во всех его видах. Измеряют его в с, мин, ч. Время тушения следует отличать от времени ликвидации пожара, принятого в пожарной тактике, так как после тушения пожарные подразделения могут продолжать заниматься действиями, связанными с прекращением горения (вскрытие и разборка конструкций, проливка скрытых очагов). Но так как физически процесс горения на этот момент времени еще продолжается, значит, продолжается и тушение – в форме подачи огнетушащих веществ.

**Секундный расход** – это количество огнетушащего вещества, подаваемое приборами подачи за одну секунду. В пожарной тактике расход – основной параметр подачи огнетушащих веществ. Измеряют его в л/с, кг/с, м<sup>3</sup>/с.

Требуемый для тушения пожара секундный расход может быть определен, если известны требуемая интенсивность тушения для данного типа объекта  $J_{\text{тр}}$  и площадь тушения  $S_{\text{т}}$  (часть площади пожара, на которую пожарные подразделения могут обеспечить подачу огнетушащих веществ):

$$g_{\text{о.в}} = J_{\text{тр}} S_{\text{т}}. \quad (6.8)$$

Это связано с тем, что пожарные подразделения далеко не всегда могут обеспечить подачу огнетушащего вещества сразу на всю площадь пожара – их возможности ограничиваются конструктивно-планировочными решениями объекта, дальностью подачи огнетушащего вещества из стволов и т. п.

Секундный расход, разделенный на имеющуюся площадь пожара (тушения), дает фактическую интенсивность подачи  $J$ :

$$J = g_{\text{о.в}} / S_{\text{т}}. \quad (6.9)$$

Если  $J$  оказалась меньше  $J_{\text{кр}}$ , прекращение горения не происходит, площадь пожара растет, а фактическая интенсивность падает. Секундный расход необходимо увеличивать введением дополнительных сил и средств. При увеличении фактической интенсивности подачи до  $J_{\text{кр}}$  наступает локализация пожара – прекращается рост площади пожара. Для прекращения горения на данной площади необходимо еще больше увеличивать секундный расход. Время тушения на данной площади будет зависеть от фактической интенсивности подачи в соответствии с «кривой тушения» (см. рис. 6.5).

Минимум зависимости  $q_{\text{уд}} = f(J)$  обусловлен характером «кривой тушения». Из рис. 6.5, а следует, что на левом участке кривой, до резкого перегиба, незначительное увеличение интенсивности подачи относительно  $J_{\text{кр}}$  приводит к резкому уменьшению времени тушения. Удельный расход также снижается. После перегиба время тушения с ростом интенсивности подачи изменяется мало. При этом, чем больше интенсивность подачи, тем меньше зависит от нее время тушения. Соответственно, увеличение интенсивности подачи на этом участке кривой приводит к росту удельного расхода (рис. 6.5, б). Поскольку удельный расход характеризует затраты огнетушащего вещества, интенсивность подачи, при которой он минимален, считается оптимальной  $J_{\text{opt}}$  для прекращения горения.

**Показатель эффективности тушения** – это величина, характеризующая качество работы комплекса «огнетушащее вещество – способ подачи».

Под эффективностью в самом общем смысле понимают отношение результатов к затратам. В процессе тушения пожара результатом будет являться потушенная площадь, а затратами будут являться количество израсходованного огнетушащего вещества и время подачи (время работы техники, людей).

Тогда  $\Pi_{э.т}$  будет равен:

$$\Pi_{э.т} = \frac{S_{п}}{G_{о.в} \tau_{т}}, \quad (6.10)$$

где  $S_{п}$  – площадь пожара;

$G_{о.в}$  – суммарное количество огнетушащего вещества, израсходованного за время  $\tau_{т}$ .

Количество поданного огнетушащего вещества можно определить через интенсивность подачи и время по формуле

$$G_{о.в} = JS_{п} \tau_{т}. \quad (6.11)$$

Если подставить это выражение в формулу (6.10), получим более удобное для анализа и расчетов выражение:

$$\Pi_{э.т} = \frac{1}{J \tau_{т}^2}. \quad (6.12)$$

Таким образом, показатель эффективности тушения имеет размерности:  $\text{м}^2/(\text{л}\cdot\text{с})$ ,  $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , т. е. – это скорость тушения одного квадратного метра площади пожара единицей количества подаваемого огнетушащего вещества.

### Контрольные вопросы

1. Что такое процесс тушения пожара?
2. Какой физико-химический процесс является основным на пожаре?
3. В каких режимах протекает пламенное горение на пожаре?
4. В чем состоит суть тепловой теории потухания Я. Б. Зельдовича?
5. Чему примерно равны значения температуры диффузионного горения и температуры потухания?
6. Какими уравнениями определяются интенсивности тепловыделения и теплоотвода в зоне горения?
7. Объясните, при каких соотношениях тепловыделения и теплоотвода процесс горения является устойчивым. Поясните на графике.
8. Расскажите, какими способами можно добиться снижения интенсивности тепловыделения при горении.
9. Расскажите, какими способами можно добиться увеличения интенсивности теплоотвода от зоны горения.
10. Как можно классифицировать огнетушащие вещества?
11. Назовите условия, необходимые и достаточные для прекращения горения газов, жидкостей, твердых веществ.
12. Назовите основные параметры процесса тушения. Дайте определения.
13. Нарисуйте характерные графики зависимости времени тушения и удельного расхода огнетушащего вещества от интенсивности подачи.
14. Какие формулы связывают между собой секундный расход огнетушащего вещества, интенсивность подачи и удельный расход?

## 7. Огнетушащие вещества

---

### 7.1. Газовые огнетушащие составы

#### 7.1.1. Нейтральные газы

Нейтральные газы (НГ) относятся к веществам объемного действия. Их вводят непосредственно в объем уже образовавшейся смеси горючего газа с окислителем для предотвращения ее воспламенения (взрыва) или в объем зоны горения для обеспечения тушения пламени. Использование этих газов в качестве огнетушащих реагентов позволяет говорить о них как об огнетушащих веществах, обладающих своими собственными механизмами огнетушащего действия и параметрами тушения.

История применения газовых огнетушащих составов насчитывает уже почти 200 лет. В 1819 году ученый П. Шумлянский впервые сформулировал идею о тушении с помощью инертных газов. Он предложил рецепт огнетушащего состава: «самого низкого пороха мякоть, простая глина и вода в известной пропорции соединенные».

Горным инженером Кюном из Саксонии в 1846 году были изобретены огнетушащие коробки, которые начинялись смесью серы (66 %), селитры (30 %) и угля (4 %). При сгорании смеси выделялись газы, препятствующие развитию пламени.

Около 1889 года русский ученый М. Колесник-Кулевич дает научное обоснование метода газового тушения. Он приходит к выводу, что «для тушения пламени вещество должно быть газообразным или легко переходящим в газы». В качестве одного из таких газов им был рассмотрен диоксид углерода.

В настоящее время к данному виду огнетушащих веществ относят диоксид углерода, азот, водяной пар, гелий и аргон. Из них гелий и аргон являются химически инертными веществами. Остальные способны вступать в различные химические реакции и являются нейтральными только по отношению к компонентам конкретной реагирующей смеси, так как или просто не вступают в реакцию горения, или сами являются ее продуктами.

Чаще всего используется диоксид углерода как самый эффективный и дешевый. Также распространение в пожаротушении получили азот и аргон. Остальные инертные газы практически не применяются вследствие малой доступности в природе. Водяной пар также имеет недостаток – он быстро

возвращается в жидкую фазу при температурах менее 100 °С (температура кипения воды), не оказывая своего объемного разбавляющего действия.

Основой применения НГ является тушение пожаров в закрытых (практически герметичных) помещениях твердых нетлеющих горючих материалов, горючих жидкостей и материальных ценностей, которые могут быть повреждены водой, пеной и другими видами огнетушащих веществ.

В основе огнетушащего действия нейтральных газов лежат несколько физических механизмов. Из курса теории горения известно, что в химическую реакцию вступают лишь те молекулы горючего и окислителя, энергия которых в момент соударения превышает энергетический барьер. Выделяемое при этом тепло передается соседним молекулам, увеличивая их энергию. Если она превышает энергию активации, эти молекулы также реагируют с образованием продуктов горения и выделением тепла, продолжая тем самым цепь последовательных превращений горючего и окислителя в продукты горения. Чем больше соударений активных реагирующих молекул, тем больше интенсивность тепловыделения и, соответственно, выше скорость химической реакции. Распространение пламени от источника зажигания по газовой смеси становится возможным при достижении скорости реакции некоторого минимального значения.

В газообразной смеси горючего с окислителем возможны три вида соударений молекул: горючее – горючее, окислитель – окислитель и горючее – окислитель. Очевидно, что эффективными, т. е. приводящими к распространению реакции, являются соударения только последнего вида. Изменение соотношения компонентов приводит к изменению числа эффективных соударений и, как следствие, скорости химической реакции. При снижении скорости реакции до определенного предела интенсивность тепловыделения становится недостаточной для распространения пламени в смеси. Поэтому смесь горючих газов или паров с окислителем способна воспламеняться от источника зажигания, если концентрация горючего в ней соответствует области воспламенения, т. е.  $\varphi_{\text{НКПРП}} \leq \varphi \leq \varphi_{\text{ВКПРП}}$ . Добавление третьего компонента, не способного вступать в реакцию ни с горючим, ни с окислителем, уменьшает концентрацию молекул обоих в единице объема (то есть  $\varphi_{\text{Г}}$  и  $\varphi_{\text{Ок}}$ ). В результате этого сокращается число эффективных соударений молекул горючего и окислителя, уменьшается интенсивность выделения тепла внутри смеси  $q^+$ :

$$q^+ = Q_{\text{н}} k_0 \varphi_{\text{Г}}^n \varphi_{\text{Ок}}^m \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (7.1.1)$$

где  $Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания горючего;

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель;

$\varphi_{\text{Г}}$  и  $\varphi_{\text{Ок}}$  – концентрация горючего и окислителя, соответственно;

$n$  и  $m$  – порядок реакции по горючему и окислителю, соответственно;

$E$  – энергия активации;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура.

При некоторой концентрации инертного в данных условиях разбавителя (флегматизатора) число эффективных соударений сокращается настолько, что выделяемого тепла становится недостаточно для распространения пламени на весь объем смеси.

Концентрационная область воспламенения при добавлении флегматизатора сужается и при некоторой его концентрации верхний предел становится равным нижнему. Данная концентрация называется *минимальной флегматизирующей*  $\varphi_m$  (рис. 7.1.1).

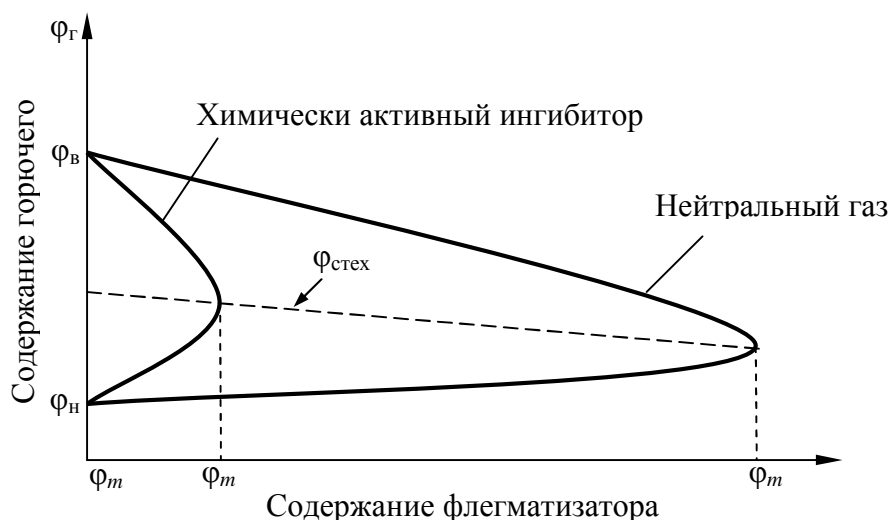


Рис. 7.1.1. Влияние флегматизатора на область воспламенения:  
 $\varphi_{стех}$  – стехиометрическая концентрация

Эффективность нейтральных газов при их использовании для предотвращения воспламенения образовавшейся горючей смеси должна зависеть от способности их молекул поглощать энергию соударений, т. е. от теплоемкости.

*Теплоемкостью* называется количество теплоты, которое необходимо для нагревания единицы количества газа на 1 градус. В технических расчетах теплоемкость измеряют в килоджоулях. В зависимости от того, в каких единицах измеряют количество газа, различают: мольную, массовую и объемную теплоемкость. При определении объемной теплоемкости принято указывать, к каким значениям температуры и давления она относится.

Теплоемкость газов, подчиняющихся законам идеального газа, зависит только от температуры. Различают среднюю и истинную теплоемкость газов. Истинная теплоемкость представляет собой отношение бесконечно малого количества подведенной теплоты  $\Delta Q$  при увеличении температуры на бесконечно малую величину  $\Delta T$ .



Средняя теплоемкость определяет среднее количество подведенной теплоты при нагревании единицы количества газа на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

В зависимости от характера протекания процесса, при котором происходит подвод или отвод теплоты, величина теплоемкости газа будет различной. Если газ нагревается при постоянном объеме ( $V = \text{const}$ ), то теплота расходуется только на повышение его температуры. Если газ может свободно расширяться, то при подводе теплоты давление газа остается постоянным ( $P = \text{const}$ ). При этом, подогреваясь, газ расширяется и производит работу против внешних сил при одновременном увеличении его температуры. Для того чтобы разность между конечной и начальной температурами во время нагрева газа в процессе  $P = \text{const}$  была бы такой же, как и в случае нагрева при  $V = \text{const}$ , количество затрачиваемой теплоты должно быть больше на величину, равную совершенной газом работе в процессе  $P = \text{const}$ . Из этого следует, что теплоемкость газа при постоянном давлении будет больше теплоемкости при постоянном объеме.

В процессах прекращения горения мы в подавляющем большинстве случаев сталкиваемся с изобарическими процессами, поэтому и интересоваться нас будет именно теплоемкость при постоянном давлении. Зависимости массовой теплоемкости некоторых газов от температуры приведены на рис. 7.1.2.

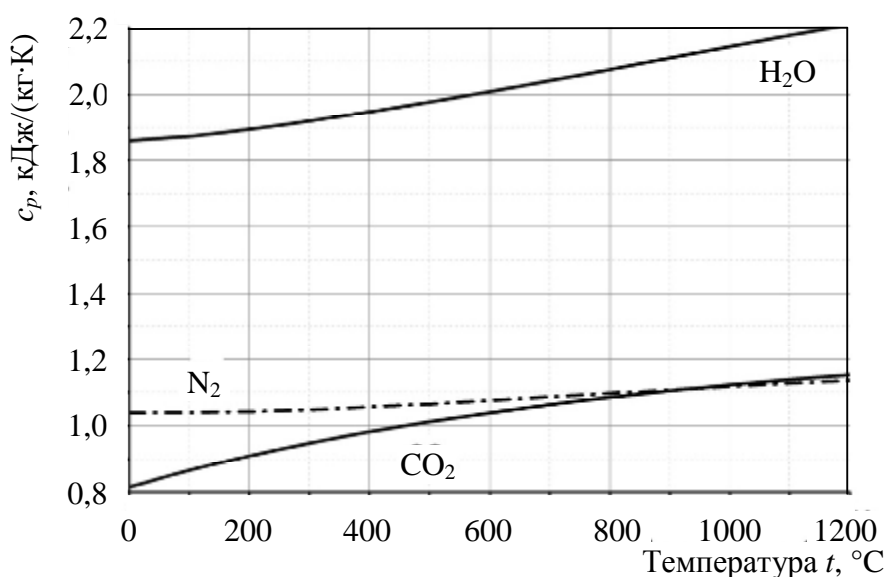


Рис. 7.1.2. Зависимость массовой теплоемкости  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  от температуры при постоянном давлении

Как видно, массовая теплоемкость у газов растет с повышением температуры, однако при этом растет и объем газа. А так как газы – огнетушащие вещества объемного действия, то реальное значение имеет объемная теплоемкость, а она у газов, наоборот, с ростом температуры – уменьшается.

В табл. 7.1.1 приведены сравнительные данные по теплоемкости наиболее распространенных нейтральных газов при 25 °С. Из них следует, что, хотя наибольшим значением массовой теплоемкости обладает гелий, самым эффективным является CO<sub>2</sub>, 1 киломоль или кубометр которого обладает наибольшей объемной теплоемкостью.

Таблица 7.1.1

**Сравнительные данные по характеристикам некоторых нейтральных газов**

Газ	M, кг/кмоль	$c_p^{298}$			$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$\frac{c_p}{\lambda} 10^{-3}$	$\varphi_m,$ % об.	$\varphi_{огн},$ % об.
		кДж/(кг·К)	кДж/(кмоль·К)	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$				
CO <sub>2</sub>	44	0,84	37,0	1,54	1,66	2,23	25–35	28
N <sub>2</sub>	28	1,04	29,1	1,21	2,57	1,13	35–48	31
H <sub>2</sub> O <sub>пар</sub>	18	1,87*	33,7*	1,10*	2,50	1,35	35–40	–
He	4,0	5,20	20,8	0,87	15,20	0,136	35–40	30
Ar	39,3	0,52	20,4	0,85	1,77	1,152	40–51	38

\* При 300 К.

*Примечание.* M – молярная масса;  $c_p^{298}$  – удельная теплоемкость при 298 К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\varphi_m$  – минимальная флегматизирующая концентрация;  $\varphi_{огн}$  – минимальная нормативная огнетушащая концентрация.

Удельная теплоемкость газовых смесей может быть определена расчетным путем. Она равна сумме произведений объемных или массовых долей каждого газа на его теплоемкость:

$$c_p = \frac{1}{100 \sum (c_{pi} \varphi_i)}, \quad (7.1.2)$$

где  $c_{pi}$  – теплоемкость  $i$ -го компонента;

$\varphi_i$  – процентное содержание газа в смеси.

Однако не только теплоемкость определяет огнетушащую эффективность газа. Дело в том, что скорость распространения пламени по перемешанной смеси в присутствии флегматизаторов зависит и от интенсивности передачи тепла из зоны реакции в свежую горючую смесь. Чем ниже теплопроводность смеси, тем меньше скорость распространения пламени. Поэтому флегматизирующая способность нейтральных газов определяется соотношением теплоемкости и теплопроводности –  $c_p / \lambda$ .

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества и в общем случае зависит от температуры, давления и рода вещества. В большинстве случаев коэффициент теплопроводности для различных материалов определяется экспериментально с помощью различных методов.

Большинство из них основано на измерении теплового потока и градиента температур в исследуемом веществе.

Согласно кинетической теории перенос теплоты теплопроводностью в газах при обычных давлениях и температурах определяется переносом кинетической энергии молекулярного движения в результате хаотического движения и столкновения отдельных молекул газа. При этом коэффициент теплопроводности определяется соотношением:

$$\lambda = \bar{\omega} l c_v \frac{\rho}{3}, \quad (7.1.3)$$

где  $\bar{\omega}$  – средняя скорость перемещения молекул газа;

$l$  – средняя длина свободного пробега молекул газа между соударениями;

$c_v$  – теплоемкость газа при постоянном объеме;

$\rho$  – плотность газа.

С увеличением давления в равной мере увеличивается плотность, уменьшается длина пробега – произведение  $l\rho$  сохраняется постоянным. Поэтому коэффициент теплопроводности заметно не меняется с изменением давления. Исключение составляют очень малые (меньше  $2,66 \cdot 10^3$  Па) и очень большие (более  $2 \cdot 10^9$  Па) давления. Средняя скорость перемещения молекул газа зависит от температуры:

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}, \quad (7.1.4)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8 314,2 Дж/(кмоль·К);

$T$  – температура, К;

$\mu$  – молекулярная масса газа.

Массовая теплоемкость газов возрастает с повышением температуры. Этим объясняется тот факт, что коэффициент теплопроводности для газов с повышением температуры также растет. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для газов лежит в пределах от 0,006 до 0,6 Вт/(м·К). На рис. 7.1.3 представлены результаты измерений коэффициента теплопроводности различных газов, проведенных Н. Б. Варгафтиком [9].

Среди газов резко выделяются своим коэффициентом теплопроводности гелий и водород. Коэффициент теплопроводности у них в 5–10 раз больше, чем у других газов. Это наглядно видно на рис. 7.1.4. Молекулы гелия и водорода обладают малой массой, а следовательно, имеют большую среднюю скорость перемещения, чем и объясняется их высокий коэффициент теплопроводности.

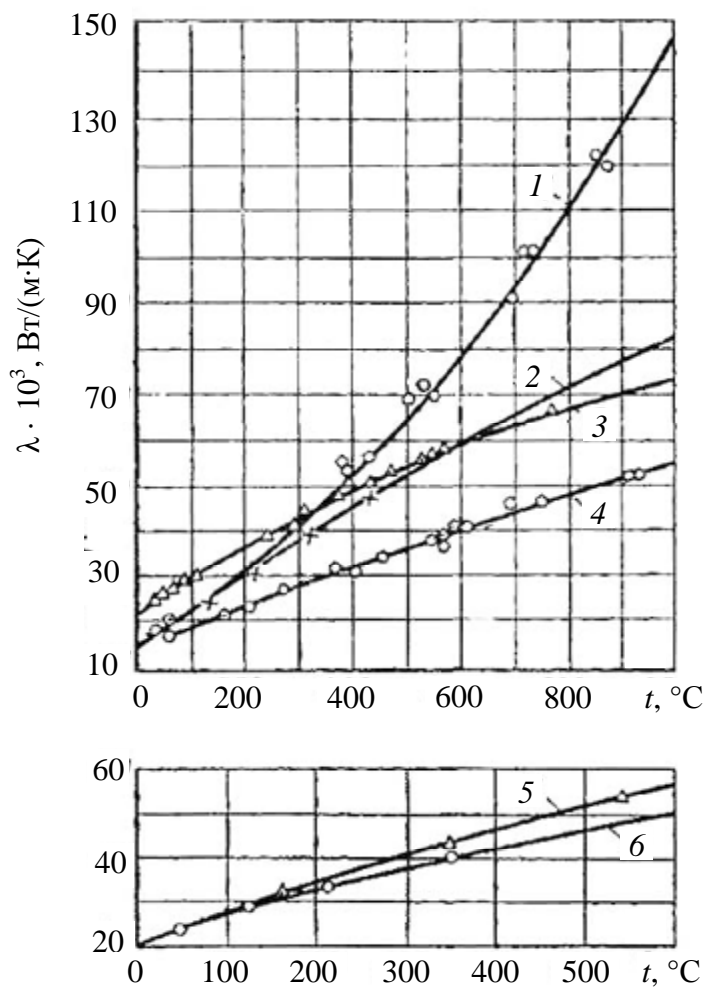


Рис. 7.1.3. Коэффициенты теплопроводности газов: 1 – водяной пар; 2 – двуокись углерода; 3 – воздух; 4 – аргон; 5 – кислород; 6 – азот

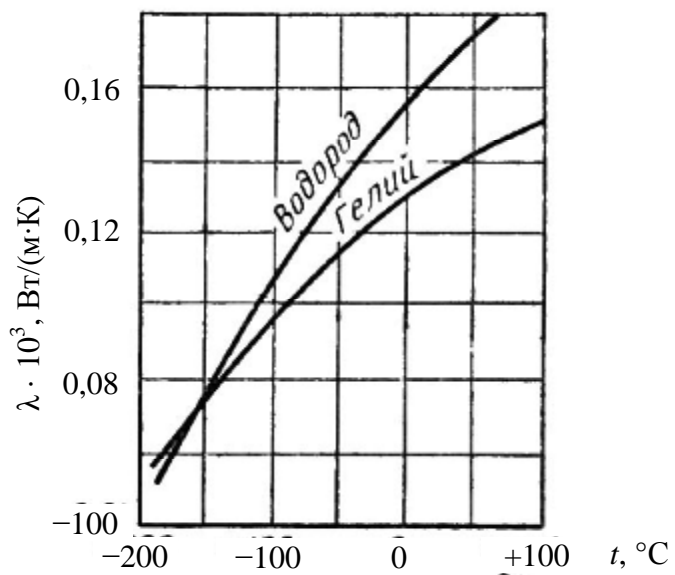


Рис. 7.1.4. Коэффициенты теплопроводности гелия и водорода

Коэффициенты теплопроводности водяного пара и других реальных газов, существенно отличающихся от идеальных, сильно зависят также от давления, но с этим приходится сталкиваться достаточно редко. Для газовых смесей коэффициент теплопроводности не может быть определен по закону аддитивности, его нужно определять опытным путем.

Таким образом, сразу две теплофизические характеристики определяют на практике минимальную флегматизирующую концентрацию нейтрального газа. Значения  $\varphi_m$  различаются также и для разных горючих веществ. Этим объясняется довольно значительный приведенный интервал флегматизирующих концентраций у каждого нейтрального газа.

Минимальную флегматизирующую концентрацию находят экспериментально путем определения концентрационных пределов распространения пламени по паро- или газозоодушным смесям в присутствии флегматизатора. При этом температура смеси должна быть такой, чтобы все компоненты находились в газообразном состоянии. По результатам опытов строят график, показанный на рис. 7.1.1. За минимальную флегматизирующую принимается концентрация исследуемой добавки, соответствующая пику кривой.

Однако на практике гораздо чаще приходится сталкиваться не с флегматизацией, т. е. предварительным разбавлением горючей смеси, а с процессом тушения, когда уже существует пламенное диффузионное горение. В этом случае говорят уже не о флегматизирующей, а об огнетушащей концентрации нейтрального газа, которую необходимо создать в газовой среде для прекращения горения.

Минимальной огнетушащей ( $\varphi_{огн}$ , см. табл. 7.1.1) называется наименьшая концентрация нейтрального газа или химически-активного ингибитора, при которой прекращается диффузионное пламенное горение. Ее значения обычно несколько меньше, чем значения флегматизирующей концентрации. Связано это с тем, что диффузионное горение само по себе менее устойчиво, чем кинетическое, а в зоне горения к тому же и так наблюдаются значительные теплотери вследствие химического недожога и излучения.

Для экспериментального определения минимальной огнетушащей концентрации используют метод диффузионной или «чашечной» горелки. Сущность данного метода заключается в нахождении наименьшего содержания газообразного огнетушащего вещества в потоке воздуха, при котором прекращается горение жидкости.

Схема установки для определения огнетушащей концентрации газовых составов приведена на рис. 7.1.5. По результатам экспериментов рассчитывают минимальную огнетушащую концентрацию газового состава в % об. по формуле (7.1.5):

$$\varphi_{\min} = \frac{V_{\min}}{V_B + V_{\min}} 100, \quad (7.1.5)$$

где  $V_{\min}$  – минимальный расход газового состава, при котором достигается максимально возможное время тушения, л/с;

$V_B$  – расход воздуха через расходомер, л/с.

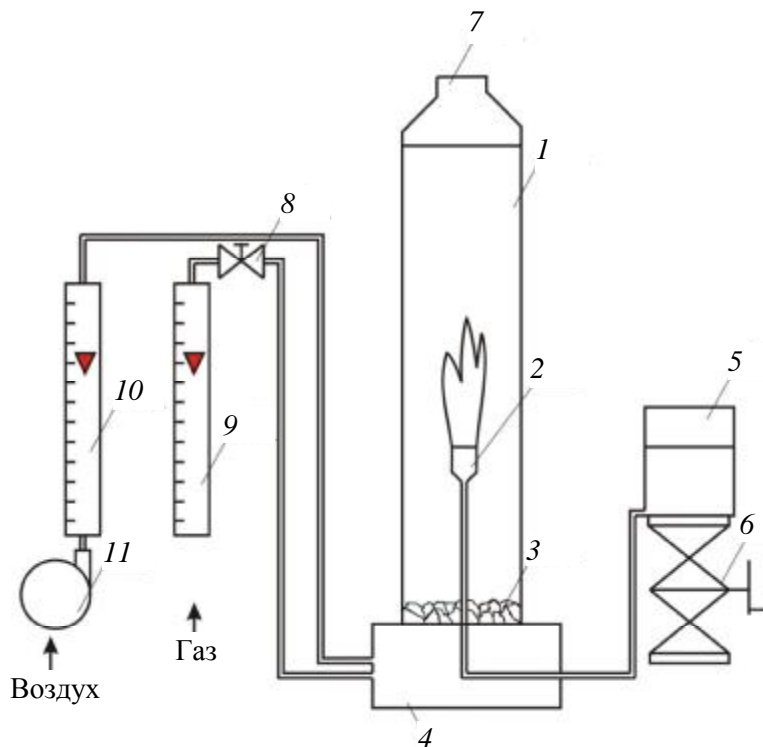


Рис. 7.1.5. Схема установки для определения

минимальной огнетушащей концентрации газовых составов:

- 1 – стеклянная труба; 2 – горелка; 3 – слой стеклянного боя; 4 – основание;
- 5 – расширительная емкость для ГЖ; 6 – подъемный столик; 7 – колпак;
- 8 – вентиль трехходовой; 9, 10 – расходомеры газовые; 11 – воздуходувка

Значения минимальной огнетушащей концентрации, полученные данным методом, используются при контроле качества газовых огнетушащих составов.

В практических же расчетах при проектировании автоматических установок газового пожаротушения, а также при контроле качества газовых огнетушащих составов используют значение нормативной объемной огнетушащей концентрации, которая определяется умножением минимальной огнетушащей концентрации на коэффициент безопасности, равный 1,7 для диоксида углерода и 1,2 – для других газовых составов, включая химически активные ингибиторы.

Для различных типов горючих жидкостей нормативные огнетушащие концентрации нейтральных газов также различаются. В расчетах параметров подачи газов на пожаротушение чаще всего используют значение  $\Phi_{\text{огн}}$  для н-гептана, а при тушении пожаров класса А1 полученное значение требуемой массы газового состава умножают на коэффициент, учитывающий вид горючего ( $K = 1,3 \div 2,25$ ).

В настоящее время найдено применение не только индивидуальным газам, но и их смесям, например «Инерген» – смесь газов состава: N<sub>2</sub> – 52 %; Ar – 40 %; CO<sub>2</sub> – 8 %. Значения огнетушащих концентраций для некоторых типов горючих жидкостей приведены в табл. 7.1.2.

Таблица 7.1.2

**Значения огнетушащих концентраций нейтральных и инертных газов**

Горючий материал	Нормативная огнетушащая концентрация, % об.			
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	«Инерген»
Н-гептан	34,9	34,6	39,0	36,5
Этанол	35,7	36,0	46,8	36,0
Бензин А-76	–	33,8	44,3	–
Масло машинное	–	27,8	36,1	28,3
Ацетон технический	33,7	–	–	37,2
Толуол	30,9	–	–	–
Спирт изобутиловый	33,2	–	–	–
Керосин осветительный КО-25	32,6	–	–	–
Растворитель 646	32,1	–	–	–

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 CO<sub>2</sub> 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 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 CO<sub>2</sub> в интервале 0–1000 °С составляет 1,99 кДж/(м<sup>3</sup>·К) или 1,47 кДж/(кг·К). Таким образом, диоксид углерода может оказывать весьма существенное охлаждающее действие на зону горения и горючее вещество.

Теоретический охлаждающий эффект диоксида углерода:

– *твердого при объемном тушении*  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/кг:

$$Q_{\text{охл}} = r + c(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (7.1.6)$$

где  $r = 574,0$  кДж/кг;  
 $c = 1,47$  кДж/(кг·К);  
 $T_{\text{пот}}$  – температура потухания,  $T_{\text{пот}} = 900 \div 1000$  °С;  
 $T_0 = -78,5$  °С;

– твердого при охлаждении прогретого слоя жидкости  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/кг:

$$Q_{\text{охл}} = r + c(T_{\text{кип}} - T_0), \quad (7.1.7)$$

где  $r = 574,0$  кДж/кг;  
 $c = 1,0$  кДж/(кг·К);  
 $T_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкости, °С;  
 $T_0 = -78,5$  °С;

– газообразного при объемном тушении  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_{\text{охл}} = c_p(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (7.1.8)$$

где  $c_p = 1,99$  кДж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $T_0$  – начальная температура газа, °С;  
 $T_{\text{пот}}$  – температура потухания,  $T_{\text{пот}} = 900 \div 1000$  °С.

*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 –  $199$  кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газообразного азота  $1,05$  кДж/(кг·К) в интервале  $0-100$  °С.

*Водяной пар* целесообразно предусматривать для защиты помещений там, где имеются паропроизводящие установки. Применяться может насыщенный, отработанный и перегретый технологический пар как для заполнения объемов, так и защиты технологических установок паровыми завесами. Огнетушащая объемная концентрация водяного пара в воздухе принимается  $35$  %. Наибольший эффект дает применение пара при тушении пожара в герметичных помещениях. Максимальный защищаемый объем не должен превышать  $500$  м<sup>3</sup>. Интенсивность подачи пара для неветилируемых помещений и замкнутых объемов должна составлять  $0,002-0,003$  кг/(с·м<sup>3</sup>). Для вентилируемых помещений и объемов интенсивность подачи должна составлять не менее  $0,005$  кг/(с·м<sup>3</sup>).

В отличие от других газов водяной пар легко конденсируется и его концентрация в ходе тушения уменьшается. Поэтому установки объемного тушения должны обеспечивать достаточно длительную подачу пара – порядка  $3$  мин. Следует также исключить контакт водяного пара с открытыми участками кожи человека, так как ожоги паром более тяжелые, чем ожоги кипящей водой.

*Гелий* и *аргон* как огнетушащие вещества используются достаточно редко в силу низкой эффективности и довольно большой стоимости.



## 7.1.2. Химически активные ингибиторы

Хладоны, или фреоны, используются в пожаротушении с начала XX века. Известно более 40 различных видов хладона, представляющих собой углеводороды (в основном производные метана и этана), в которых один или более атомов водорода замещены атомами из группы галогенов: фтором, хлором, бромом, йодом.

Уже к 1910 году массовое применение получили огнетушители, заправленные четыреххлористым углеродом ( $\text{CCl}_4$ , тетрахлорметан или хладон 10). Вскоре выяснилось, что это вещество ядовито и вызывает серьезные повреждения печени. Первый случай гибели людей от отравления хладоном произошел на строящейся подводной лодке: в 1919 году в США отравились при тушении пожара двое рабочих верфи. От использования хладона 10 вскоре отказались, но пришедшие ему на смену метилбромид (хладон 1001) и хлорбромметан (хладон 1011) также оказались токсичными.

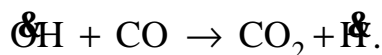
Однако высокая эффективность хладонов при тушении пожара перевесила потенциальную опасность этих веществ. Во-первых, хладона для тушения пожара требуется гораздо меньше, чем других газовых огнетушащих составов. Во-вторых, хладоновые системы оказались на порядок дешевле и проще ближайших аналогов. Это особенно важно при размещении противопожарных систем в небольших объемах, например на подводной лодке. В-третьих, хладоны гарантированно тушат даже те вещества, которые нельзя потушить водой или пеной.

Уже во время Второй мировой войны хладоны стали использоваться в системах пожаротушения на кораблях и военных самолетах в Британии и Германии. А с 1960-х годов хладоны стали основным средством объемного пожаротушения как в армии, так и в промышленности во всем мире.

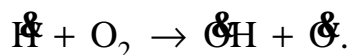
В отличие от нейтральных газов химически активные ингибиторы (ХАИ) практически не влияют на число активных соударений молекул и окислителя. Их огнетушащие концентрации не превышают 10 % об. Механизм огнетушащего действия заключается в торможении (ингибировании) реакции горения путем нейтрализации промежуточных продуктов. Дело в том, что реакция горения является многостадийной. Сначала образуются промежуточные продукты разложения горючего, затем продукты неполного окисления, потом в результате взаимодействий этих промежуточных продуктов между собой и с горючим или окислителем образуются конечные продукты реакции. Причем каждая последующая стадия может начаться при взаимодействии не любых промежуточных продуктов, а лишь химически активных комплексов – радикалов.

Так, горение органических соединений протекает в две стадии. Сначала исходное горючее окисляется до  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , на второй стадии оксид углерода сгорает до  $\text{CO}_2$ . Причем вторая стадия является лимитирующей.

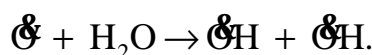
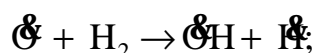
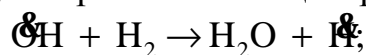
На этой стадии при температурах порядка 1000 К в результате взаимодействия СО с гидроксильной группой ОН образуются конечный продукт СО<sub>2</sub> и активный центр – радикал Н:



Радикал Н реагирует с О<sub>2</sub> и образуются два активных центра – радикалы ОН и О:



В результате реакций с участием этих радикалов появляются один конечный продукт – Н<sub>2</sub>О и уже три активных центра и т. д.:



Реакция представляет собой разветвленный цепной процесс. Если в зону его протекания ввести дополнительные вещества, нейтрализующие активные центры, которые участвуют в продолжении цепей (Н, ОН, НО<sub>2</sub>), будет происходить обрыв этих цепей, торможение реакции, уменьшение интенсивности тепловыделения и в конечном счете – прекращение горения. Причем горение прекращается при гораздо более высокой температуре, чем в случае применения нейтральных газов (рис. 7.1.6).

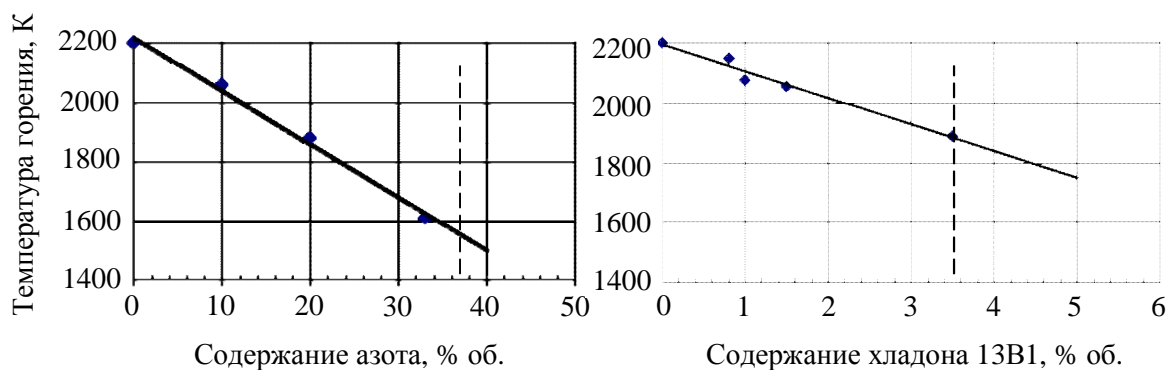
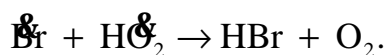
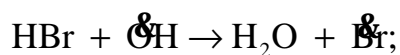
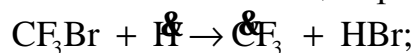
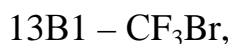


Рис. 7.1.6. Зависимость адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси от содержания флегматизатора [5]  
(пунктиром обозначена минимальная флегматизирующая концентрация)

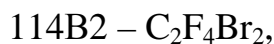
Подобным действием и обладают хладоны. Например, вот как будет выглядеть их взаимодействие с активными центрами реакции горения:



Для хладонов разработана система обозначений – номенклатура, представляющая собой буквенно-цифровой шифр содержания различных элементов в молекуле вещества. Расшифровка производится справа налево. Последняя цифра обозначает количество атомов фтора в молекуле; предпоследняя – атомов водорода, увеличенное на 1 (то есть  $H + 1$ ); первая – атомов углерода, уменьшенное на 1 (то есть  $C - 1$ ). В маркировку бромосодержащих хладонов, добавлена буква «В» и цифра, означающая количество атомов брома. В данной системе маркировки не указываются напрямую атомы хлора. Предполагается, что хлор занимает оставшиеся свободные связи. Примеры:



здесь  $Br = 1$ ,  $F = 3$ ;  $H + 1 = 1$ , значит,  $H = 1 - 1 = 0$ ;  $C - 1 = 0$ , откуда  $C = 0 + 1 = 1$ ;



здесь  $Br = 2$ ,  $F = 4$ ,  $H = 1 - 1 = 0$ ,  $C - 1 = 1$ , откуда  $C = 1 + 1 = 2$ ;



здесь  $Br = 1$ ,  $F = 2$ ;  $H + 1 = 1$ , следовательно,  $H = 1 - 1 = 0$ ;  $C - 1 = 0$ , откуда  $C = 0 + 1 = 1$ , оставшаяся у углерода одна свободная связь занята  $Cl$ ;



В последнем случае буква «Ц» обозначает, что данное вещество имеет циклическое строение.

За рубежом наибольшее распространение получил хладон 13B1 (он же трифторбромметан, он же  $CF_3Br$ ) – бесцветный газ без запаха. Он малотоксичен: предельно допустимая концентрация – 30 тыс.  $mg/m^3$ . По данным Национальной ассоциации противопожарной защиты США, у людей признаков отравления не отмечено при содержании 13B1 в воздухе в количестве 5–7 % об. (для тушения достаточно 5 %).

В СССР (а теперь и в России) более широкое применение получил хладон 114B2 (он же тетрафтордибромэтан, он же  $C_2F_4Br_2$ ) – тяжелая бесцветная жидкость со специфическим запахом. Он обладает более высокой эффективностью при тушении пожаров (огнетушащая концентрация – около 2 % об.), но в 30 раз более токсичен (предельно допустимая концентрация – 1 тыс.  $mg/m^3$ ). При проведении опытов с хладоном 114B2 в Италии нарушения функционального состояния центральной нервной системы наблюдались уже при концентрации 0,22 % об. Продукты термического разложения хладона 114B2 имеют летальную концентрацию 0,16 % об. Такой выбор обусловлен тем, что его производство обходилось почти в три раза дешевле. Хладон 12B1 использовался в основном в переносных огнетушителях, так как он имел небольшое давление паров и в связи с этим не требовал прочных емкостей для хранения.

Также иногда хладоны подразделяют по областям использования. Применяемые для производства аэрозолей называют *пропеллентами*, хладоагенты для холодильных установок – *рефрежентами*, а хладоны, используемые для пожарной защиты, – *галонами*.

Для галонов используется более простое обозначение четырехзначными цифрами. Например:  $\text{CF}_3\text{Br}$  – 1301;  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$  – 2402;  $\text{CF}_2\text{ClBr}$  – 1211. Здесь первая цифра означает количество атомов углерода, вторая – атомов фтора, третья – атомов хлора, четвертая – атомов брома. Число атомов водорода определяется по количеству оставшихся свободных связей. Так,  $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$  (хладон 227) имеет обозначение галон 3700.

Проведенные в 1947 г. в США масштабные исследования огнетушащей способности и токсичности различных галогенуглеводородов показали, что их огнетушащая способность связана со строением молекулы и возрастает в ряду F-, Cl-, Br- замещенных углеводородов. Энергия химической связи уменьшается в ряду  $\text{C-F} > \text{C-Cl} > \text{C-Br}$ . Поэтому бромсодержащие углеводороды подвергаются термической диссоциации при более низких температурах и оказывают более сильное ингибирующее действие на реакцию горения. В связи с этим можно предположить, что еще большей огнетушащей способностью будут обладать йодсодержащие углеводороды.

Из 60 исследованных соединений в результате испытаний было отобрано четыре хладона: 12B2 ( $\text{CF}_2\text{Br}_2$ ), 12B1 ( $\text{CF}_2\text{ClBr}$ ), 13B1 ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ) и 114B2 ( $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ ). Первый хладон обладал наибольшей огнетушащей способностью, однако он был самым токсичным. Поэтому дальнейшее применение в качестве огнетушащих веществ нашли хладоны 12B1, 13B1 и 114B2. Некоторые свойства этих хладонов, а также (для сравнения) свойства диоксида углерода приведены в табл. 7.1.3.

Таблица 7.1.3

Хладон	Температура кипения, °С	Минимальная флегматизирующая концентрация, % об.	Токсичность LD <sub>50</sub> *, % об.
12B1	-4	3,8	13
13B1	-58	3,5	80
114B2	47	2,5	10
CO <sub>2</sub>	-76	28,0	9

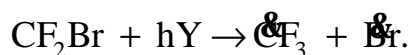
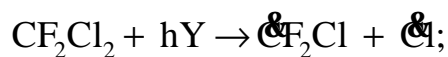
\* Токсичность LD<sub>50</sub> – концентрация вещества в воздухе, вызывающая гибель половины подопытных животных в стандартных условиях испытаний.

Как видно, в отличие от CO<sub>2</sub> огнетушащие концентрации этих хладонов в несколько раз меньше концентраций, при которых возможен летальный исход. Это позволило применять хладоновые установки пожаротушения, в частности, в тех случаях, когда затруднена или невозможна эвакуация людей.

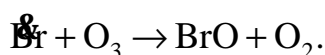
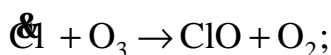
### 7.1.3. Озоноразрушающее действие хладонов

В 70-х – начале 80-х годов XX века было обнаружено, что толщина озонового слоя, который защищает все живое на земле от жесткого ультрафиолетового излучения, стала резко уменьшаться и что одной из основных причин этого является выброс в атмосферу галогенуглеводородов. Озоновый слой, как известно, располагается на высоте от 7 до 20 км. Над Антарктидой расстояние до него от поверхности земли 7–9 км, в районе экватора 15–20 км. Плотность хладонов в несколько раз больше плотности воздуха и нет четких доказательств того, что они способны достигать столь большой высоты. Однако сам механизм их озоноразрушающего действия подтвержден, и в соответствии с международными соглашениями производство озоноразрушающих хладонов прекращено во всем мире.

Под действием ультрафиолетового излучения молекулы хладонов диссоциируют с образованием атомов галогенов. Например:



Образовавшиеся атомы галогенов, взаимодействуя с озоном, уничтожают его:



Озоновую активность галогенуглеводородов характеризуют озоноразрушающим потенциалом (ОРП). За единицу принят ОРП хладона 11 ( $\text{CCl}_3\text{F}$ ). К озонобезопасным относят хладоны с ОРП < 0,05. Оказалось, что самыми озоноопасными являются хлор- и бромсодержащие хладоны 12B1, 13B1 и 114B2. Значения их ОРП приведены в табл. 7.1.4.

Таблица 7.1.4

Хладон	Химическая формула	ОРП	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>
12B1	$\text{CF}_2\text{ClBr}$	3,0	6,86
13B1	$\text{CF}_3\text{Br}$	10,0	10,04
114B2	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	6,0	9,32*

\* В газообразном состоянии.

Химической промышленностью выпускаются озонобезопасные хладоны. К ним относят, например, гексафторид серы  $\text{SF}_6$  – техническое название «элегаз». Однако по огнетушащей способности все они уступают хладонам 12B1, 13B1 и 114B2. Характеристики некоторых озонобезопасных хладонов, допущенных к применению в нашей стране, приведены в табл. 7.1.5.

Таблица 7.1.5

Хладон	ОРП, % об.	Концентрация*, % об.,		LD <sub>50</sub> , % об.
		минимальная флегматизирующая	нормативная огнетушащая**	
125 (C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> H)	0	9,1	9,8	65
218 (C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )	0	6,7	7,2	80
227 (C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> H)	0	5,8	7,2	80
13B1 (CF <sub>3</sub> Br)	10	3,5	–	80
CO <sub>2</sub>	0	28,0	34,9	9

\* Для н-гептана.

\*\* По СП 5.13130.2009.

Самыми близкими к хладонам 13B1 и 114B2 по огнетушащей способности являются йодсодержащие хладоны 13I1 (CF<sub>3</sub>I) и 217I1 (C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>I). Их огнетушащая концентрация для гептана составляет 2,8 и 1,66 % об. соответственно, а ОРП равен нулю. Токсичность их также невысокая. Однако они имеют слишком большую стоимость для широкого применения.

Огнетушащая эффективность хладонов, как уже говорилось, определяется их способностью участвовать в химических реакциях, протекающих в зоне горения. Одним из продуктов этих реакций, как оказалось, является фтористый водород HF. Причем его выделяется больше при тушении пламени жидкости (очаг класса В), чем твердых горючих материалов (очаг класса А). По-видимому, это объясняется более высокой температурой горения жидкостей. Фтористый водород представляет собой газообразное вещество с резким запахом, высокотоксичное, с сильнораздражающим действием на ткани организма. Исследования ВНИИПО показали, что при одинаковых условиях озонобезопасные хладоны 125, 227еа, 218, 318Ц выделяют в 5–10 раз больше HF, чем хладон 13B1, и в замкнутом объеме создают среду, опасную для жизни и здоровья человека. Элегаз кроме HF выделяет SO<sub>2</sub>, концентрация которого достигает летальных значений. Поэтому перечисленные хладоны нельзя использовать в помещениях, из которых невозможна или затруднена эвакуация людей.

#### 7.1.4. Параметры тушения газовыми огнетушащими составами

Рассмотрим процесс тушения пожара нейтральным газом или химически активным ингибитором в негерметичном помещении на упрощенной модели. Допустим, что газообразное огнетушащее вещество, подаваемое установкой пожаротушения, мгновенно распространяется по всему

объему и его концентрация в любой точке помещения в каждый момент времени равна среднеобъемной.

Тогда концентрация газа в потоке продуктов горения, удаляющихся из помещения вследствие газообмена, также будет равна среднеобъемной, причем количество потерянного газа будет расти по мере повышения его концентрации в помещении. Также допустим, что расходы огнетушащего газа и продуктов горения во время тушения остаются постоянными. Тушение достигается, когда концентрация газа  $\varphi$  в помещении становится равна огнетушащей  $\varphi_{огн}$ . Вместо объемной концентрации  $\varphi$  будем использовать объемную долю газа  $a = \varphi / 100$ .

Составим материальный баланс процесса заполнения помещения газом:

$$q_{ГОС} d\tau = V_{пом} da + a q_{п.г} d\tau, \quad (7.1.9)$$

где  $q_{ГОС}$  – расход газового огнетушащего состава, м<sup>3</sup>/с;

$\tau$  – время, с;

$V_{пом}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$q_{п.г}$  – расход продуктов горения, м<sup>3</sup>/с.

Разделив переменные, получим:

$$d\tau = V_{пом} \frac{da}{q_{ГОС} - q_{п.г} a}. \quad (7.1.10)$$

Учитывая, что  $\tau$  изменяется от 0 до времени тушения  $\tau_T$ , а содержание газа в объеме помещения от 0 до огнетушащего  $a_{огн}$ , проинтегрируем данное выражение и, подставив значения переменных на пределах интегрирования, найдем  $\tau_T$ , с:

$$\tau_T = \frac{V_{пом}}{q_{п.г}} \ln \frac{q_{ГОС}}{q_{ГОС} - q_{п.г} a_{огн}}. \quad (7.1.11)$$

Разложим логарифм в степенной ряд по формуле  $\ln x = |(x - 1) / (x + 1)|$ . Используя первый член этого ряда, получаем выражение более удобное для анализа:

$$\tau_T = \frac{2V_{пом} a_{огн}}{2q_{ГОС} - q_{п.г} a_{огн}}. \quad (7.1.12)$$

Анализ данной формулы показывает, что при тушении пожара секундный расход газового состава не может быть меньше некоторой критической величины. Если знаменатель дроби равен нулю, то  $\tau_T \rightarrow \infty$  и прекращение горения не происходит. Такой секундный расход называется *критическим*  $q_{ГОС}^{кр}$ , м<sup>3</sup>/с. Его величина составляет:

$$q_{ГОС}^{кр} = \frac{q_{п.г} a_{огн}}{2}. \quad (7.1.13)$$

Формула (7.1.12) описывает кривую тушения газовым составом, характерный вид которой показан на рис. 7.1.7. Там же приведена характерная

зависимость удельного расхода от секундного расхода ГОС. Зависимость удельного расхода от  $q_{\text{ГОС}}$  позволяет определить оптимальное значение  $q_{\text{ГОС}}^{\text{opt}}$ ,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , при котором удельные затраты ГОС на тушение минимальны при прочих равных условиях.

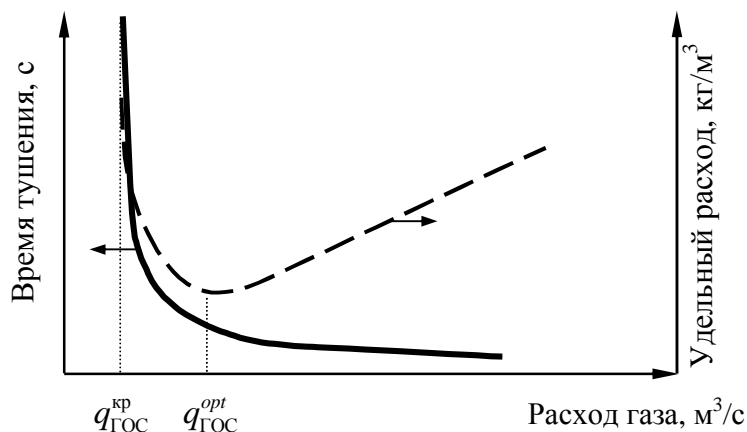


Рис. 7.1.7. Зависимость времени тушения и удельного расхода газового состава от его секундного расхода

Оптимальный секундный расход газа, соответствующий минимальным затратам огнетушащего вещества, можно оценить следующим образом. Удельный расход газа  $g_{\text{ГОС}}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , равен:

$$g_{\text{ГОС}} = \frac{q_{\text{ГОС}} \tau_{\text{Г}} M}{V_{\text{ПОМ}} 22,4}, \quad (7.1.14)$$

где  $M$  – молярная масса огнетушащего газа,  $\text{кг}/\text{кмоль}$ .

Из формул (7.1.12) и (7.1.14) получим:

$$g_{\text{ГОС}} = \frac{q_{\text{ГОС}} M a_{\text{огн}}}{11,2(2q_{\text{ГОС}} - q_{\text{плг}} a_{\text{огн}})}. \quad (7.1.15)$$

Для того чтобы найти минимум функции  $g_{\text{ГОС}} = f(q_{\text{ГОС}})$ , необходимо приравнять к нулю производную  $dg_{\text{ГОС}} / dq_{\text{ГОС}}$ . Отсюда:

$$q_{\text{ГОС}}^{\text{opt}} = 2,4 q_{\text{ГОС}}^{\text{кр}}. \quad (7.1.16)$$

Из формулы (7.1.13) следует, что критический секундный расход газового состава зависит от расхода газов, удаляющихся из помещения в результате газообмена, а также от значения огнетушащей концентрации. При пожаре в негерметичном помещении расход газов определяется проемностью помещения и температурой пожара. Эта зависимость характеризуется формулой (5.7) (см. гл. 5). Разделив  $G_{\text{Г}}$  на  $\rho_{\text{плг}}$ , получим:

$$q_{\text{плг}} = G_{\text{Г}} / \rho_{\text{плг}} = \frac{(2/3)\mu B \sqrt{2g(H_{\text{пр}} - h_0)^3 \rho_{\text{плг}}(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{плг}}) / \rho_{\text{Г}}}}{\rho_{\text{плг}}}, \quad (7.1.17)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проема ( $\mu \approx 0,65$ );  
 $B$  – ширина проема;



$H_{\text{пр}}$  – высота проема, м;

$h_0$  – высота плоскости равных давлений относительно нижней отметки проема, м;

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

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

Отсюда следует, что  $q_{\text{п.г}}$  и, соответственно, критический расход огнетушащего газа зависит не только от общей негерметичности помещения, но и от конфигурации и взаимного расположения проемов. Чем выше среднеобъемная температура в момент начала тушения, тем больше  $q_{\text{ГОС}}^{\text{кр}}$ . Если фактический расход газа окажется меньше или будет равен этой величине, то огнетушащая концентрация в объеме помещения достигнута не будет и прекращение горения не происходит.

При пожаре в герметичном помещении газообмен отсутствует. Следовательно,  $q_{\text{ГОС}}^{\text{кр}} = 0$  и время тушения  $\tau_{\text{т}}$ , с, зависит только от расхода газа и огнетушащей концентрации:

$$\tau_{\text{т}} = V_{\text{пом}} a_{\text{огн}} / q_{\text{ГОС}}. \quad (7.1.18)$$

Однако огнетушащая концентрация возрастает с повышением температуры. Поэтому при позднем обнаружении и начале тушения пожара запас газа может быть исчерпан раньше, чем наступит прекращение горения.

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

Таким образом, при проектировании и анализе эффективности автоматических установок газового пожаротушения необходимо учитывать динамику пожара в начальной стадии, величину и характер проемности защищаемого помещения.

### Контрольные вопросы

1. Какие вещества относят к нейтральным газам?
2. Какие газы относят к инертным?
3. В чем различие между инертными газами и нейтральными?
4. Что такое химически активные ингибиторы?
5. Назовите механизмы огнетушащего действия НГ.
6. Назовите механизмы огнетушащего действия ХАИ.
7. В чем состоит суть экспериментального метода определения огнетушащей концентрации газовых составов?
8. От каких физико-химических характеристик зависит огнетушащая эффективность НГ?

9. Какие НГ более эффективны, какие менее?
10. От чего зависит огнетушащая эффективность ХАИ?
11. Как расшифровывают обозначения марок хладонов?
12. Что такое озоноразрушающий потенциал ХАИ?
13. Какую опасность представляет токсическое действие хладонов?
14. Назовите наиболее распространенные в применении марки хладонов.
15. Как рассчитать время тушения газовым составом по упрощенной модели?
16. Как оценить критический и оптимальный секундный расход?
17. Что такое удельный расход газового состава при тушении, какова его размерность?
18. От каких условий зависят параметры тушения газовыми составами?

## 7.2. Вода и водные растворы

### 7.2.1. Основные физико-химические свойства воды

Вода – это древнейшее и до сих пор самое распространенное вещество, используемое для тушения пожаров. С помощью воды можно выполнить условия, необходимые и достаточные для прекращения горения веществ, находящихся в трех физических состояниях: газообразном, жидком и твердом. На основе воды получают целый класс огнетушащих веществ – противопожарные пены.

Значения основных теплофизических параметров воды приведены ниже:

температура кипения  $T_{\text{кип}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

температура замерзания  $T_{\text{зам}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

удельная теплоемкость воды  $c = 4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$  в интервале  $0\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

коэффициент теплопроводности при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\lambda = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ;

теплота парообразования при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$   $r_{\text{в}} = 2260 \text{ кДж/кг}$ ;

средняя удельная теплоемкость водяного пара  $c_p^{\text{пара}} = 2,14 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$

в интервале  $100\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

удельная теплоемкость льда  $c_{\text{л}} = 2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;

теплота плавления льда –  $334 \text{ кДж/кг}$ ;

поверхностное натяжение воды при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\sigma = 73,0 \text{ мН/м}$ ;

удельная электропроводность воды при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\Omega = 4,7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Следует иметь в виду, что все перечисленные параметры не являются физическими константами. В частности, все они в той или иной степени зависят от температуры. Так, при повышении температуры от  $0$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  коэффициент поверхностного натяжения воды уменьшается примерно на  $23 \%$ , удельная теплопроводность возрастает на  $18 \%$ . При повышении температуры от  $0$  до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  удельная электропроводность воды возрастает почти в  $2$  раза. Однако при проведении инженерных расчетов, в большинстве случаев, их зависимостью от различных факторов пренебрегают.

Физико-химические свойства воды существенно зависят от ее состава. Наиболее сильно по составу различаются морская и пресная вода. Морская вода содержит около  $3,5 \%$  различных солей. Это усредненное значение. Так, вода Атлантического океана содержит  $3,8 \%$  солей, Средиземного моря –  $3,7 \%$ , Черного моря –  $1,8 \%$ , Балтийского моря у побережья Германии –  $0,5\text{--}1,3 \%$ . В наибольшем количестве, порядка  $78 \%$ , в морской воде содержится  $\text{NaCl}$ . Остальное приходится (в порядке убывания) на  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgBr}_2$ . Все эти соли вызывают коррозию пожарного оборудования и ухудшают свойства пенообразователей.

Для сравнительных испытаний огнетушащих веществ на основе морской воды (например, пенообразователей) полагается использовать модельную смесь (ГОСТ Р 50588–93):

хлористый магний шестиводный ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) – 1,1 %;

хлористый кальций двухводный ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – 0,16 %;

сернокислый натрий безводный ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) – 0,4 %;

хлористый натрий ( $\text{NaCl}$ ) – 2,5 %;

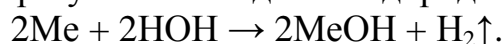
вода питьевая жесткостью до 7 мг-экв/л – до 100 %.

Пресная вода также может сильно различаться по составу. Помимо общей загрязненности вода из разных водоисточников может иметь различную жесткость – содержание солей кальция, магния. Согласно ГОСТ Р 52029–2003, жесткостью воды называется совокупность свойств, обусловленных концентрацией в ней щелочно-земельных элементов, преимущественно ионов кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Жесткость воды выражается в градусах жесткости ( $^{\circ}\text{Ж}$ ). Градус жесткости соответствует концентрации щелочно-земельного элемента, численно равной 1/2 его моля, выраженной в мг/дм<sup>3</sup> (г/м<sup>3</sup>). Численные значения жесткости в  $^{\circ}\text{Ж}$  и мг-экв/л равны.

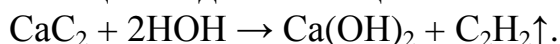
Наличие солей приводит к понижению температуры замерзания воды. Водные растворы с повышенной морозостойкостью называются *антифризы*. Как правило, они содержат  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (поташ),  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$  и этиленгликоль – основной компонент. При содержании этиленгликоля 60 % температура замерзания раствора достигает  $-50^{\circ}\text{C}$ . Однако при его содержании более 30 % раствор сам становится горючим. Присутствие хлористого магния и хлористого кальция вызывает сильную коррозию металла. Поэтому антифризы хранят в пластмассовых емкостях или в емкостях из металла с полимерным покрытием. Существуют составы для тушения тонкораспыленной водой при температуре до  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Вода не является инертным веществом. Она способна взаимодействовать с другими веществами и материалами. Различают два вида взаимодействия – химическое и физическое.

*Химическое взаимодействие воды* с некоторыми веществами может сопровождаться взрывом. Водой нельзя тушить щелочные металлы (литий, натрий, калий), магний, кальций. При этом от воды отнимается гидроксильная группа –  $\text{OH}$  и образуется свободный водород:



В результате подобной реакции воды с карбидами щелочных металлов, алюминия, бария и кальция выделяется ацетилен. Например:



Также водой нельзя тушить металлоорганические соединения, гидриды металлов. Например, диэтилалюминийхлорид –  $\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Cl}$ , используемый в качестве катализатора синтеза полимеров, гидриды  $\text{MgH}$ ,  $\text{LiH}$  и т. п.

*Физическое взаимодействие* проявляется в способности воды растворять различные вещества (твердые, жидкости и газы), смачивать и растекаться по поверхности.

Добавление воды в горючую жидкость с образованием раствора уменьшает концентрацию пара над поверхностью. При определенном содержании воды концентрация пара горючего становится ниже нижнего концентрационного предела распространения пламени – горение становится невозможным.

На рис. 7.2.1 приведены зависимости температуры вспышки этилового спирта и ацетона от их содержания в водном растворе [17].

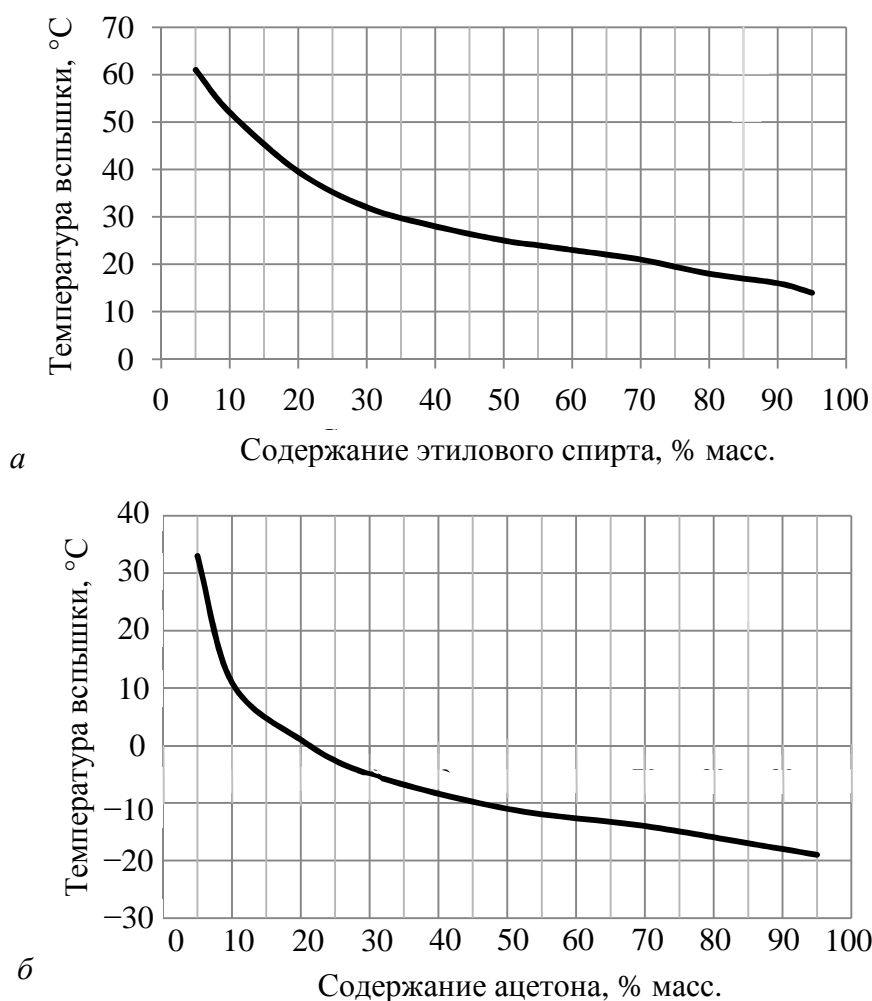


Рис. 7.2.1. Зависимость температуры вспышки водных растворов этилового спирта (а) и ацетона (б) от их содержания в растворе

Из этих данных следует, что при тушении, например, этилового спирта водой, имеющей температуру 20 °С, для прекращения горения его необходимо разбавить до содержания 65–70 % по массе. При температуре воды 25 °С содержание этанола в растворе должно быть не более 50 % масс. Растворы, содержащие менее 5 % масс. этилового спирта, не воспламеняются.

Вместе с тем потушить ацетон разбавлением водой, имеющей температуру 20 °С, удастся, если его содержание в растворе снизить до 5 % масс.

Формула разбавления водой до требуемой концентрации  $C$  имеет вид:

$$G = G_0 \left( \frac{C_0}{C} - 1 \right), \quad (7.2.1)$$

где  $G$  – требуемое количество воды, л;

$G_0$  – исходная масса раствора, кг;

$C_0$  и  $C$  – исходная и требуемая концентрации раствора соответственно, % масс.

Физическое взаимодействие воды с твердыми материалами и нерастворимыми в ней жидкостями проявляется в ее способности смачивать и растекаться по поверхности. Характеристикой смачивающей способности служит краевой угол смачивания  $\theta$ . При смачивании твердых тел – это угол между касательной к поверхности жидкости и смоченной поверхностью твердого тела. Краевой угол всегда отсчитывается от касательной в сторону жидкости (рис. 7.2.2).

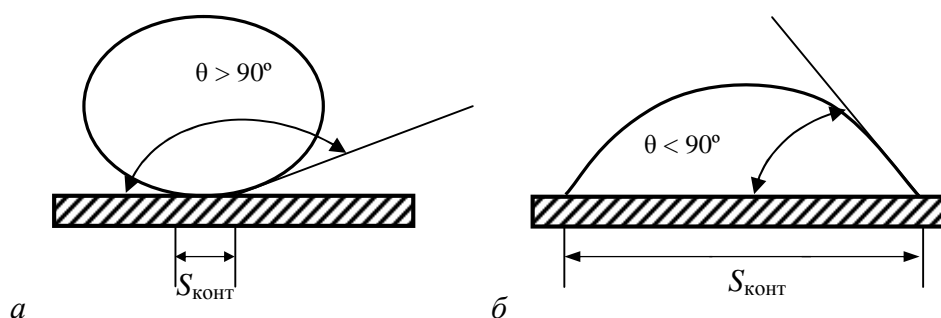


Рис. 7.2.2. Краевой угол  $\theta$  в системе вода – твердое тело – газ:

*а* – несмачивание; *б* – смачивание

При определении краевого угла в случае оценки взаимодействия воды с жидкой поверхностью проводят две касательные – к поверхности раздела вода – газ и к поверхности раздела жидкостей (рис. 7.2.3).

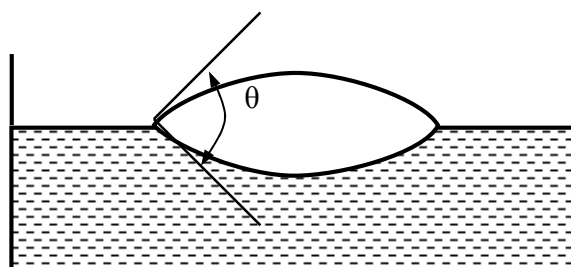


Рис. 7.2.3. Краевой угол  $\theta$  в системе вода – жидкость – газ

Различают равновесные и неравновесные краевые углы. Равновесный краевой угол зависит только от термодинамических свойств системы, а именно от поверхностных натяжений веществ на границе раздела фаз, участвующих в смачивании.

В зависимости от значений равновесного краевого угла различают три основных случая:

1. *Несмачивание* (плохое смачивание): краевой угол тупой –  $180^\circ > \theta > 90^\circ$ . Пример: вода на поверхности фторопласта или парафина.

2. *Смачивание* (ограниченное смачивание): краевой угол острый –  $90^\circ > \theta > 0^\circ$ . Пример: вода на поверхности металла, покрытого оксидной пленкой (алюминия).

3. *Полное смачивание*: равновесный краевой угол не устанавливается, капля растекается по поверхности тонкой пленкой –  $\theta \rightarrow 0$ .

Соответственно, все твердые тела разделяют на гидрофобные (рис. 7.2.2, а) и гидрофильные (рис. 7.2.2, б).

Характер смачивания зависит от соотношения сил притяжения молекул жидкости к поверхности и сил взаимного притяжения между молекулами самой жидкости. Под действием сил взаимного притяжения молекулы жидкости стремятся опуститься в нижележащие слои. Для их перевода на поверхность требуется затратить работу, которая (в расчете на единицу площади) называется *поверхностным натяжением*. Чем выше поверхностное натяжение жидкости, тем хуже ее смачивающая способность, но выше текучесть. Последнее объясняется стремлением капли принять сферическую форму. В результате этого площадь контакта  $S_{\text{конт}}$  с твердой поверхностью капли жидкости, имеющей высокое поверхностное натяжение, очень мала (см. рис. 7.2.2, а), и капля легко с нее скатывается.

Ниже приведены значения коэффициента поверхностного натяжения некоторых жидкостей (в мН/м), граничащая среда – воздух:

вода	72,8
ацетон	23,7
н-гексан	18,4
керосин	24,0
нефть	30,0
оливковое	
масло	34,0
сероуглерод	30,5

Как видно из этих данных, вода обладает высоким поверхностным натяжением, что определяет ее плохую смачивающую способность для многих твердых материалов. Чистая вода (без специальных добавок) на поверхности нерастворимых в ней горючих жидкостей также не способна растекаться и образовывать пленку. Ее капли стягиваются в сферы и за счет более высокой плотности тонут.

При попадании на пористую поверхность, например древесины или ее обугленного слоя, вода одновременно впитывается в поры материала и растекается. Чем больше скорость и глубина смачивания, тем более эффективно тушение водой. Так же, как и на гладкой поверхности, условием капиллярного смачивания является  $\theta < 90^\circ$ .

При отсутствии смачивания ( $\theta > 90^\circ$ ) прониканию воды в капилляр препятствует давление сжимаемого в нем газа  $p_1$ , которое превышает атмосферное  $p_{\text{атм}}$  (рис. 7.2.4). В результате этого вода в материал не впитывается и стекает с его поверхности, практически не участвуя в тушении.

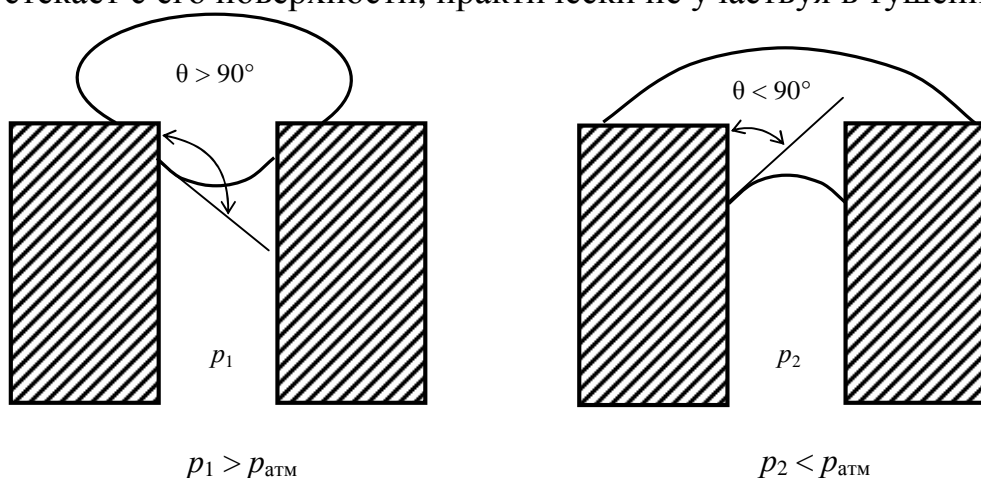


Рис. 7.2.4. Схема взаимодействия капли воды с пористой поверхностью

Если  $\theta < 90^\circ$ , силы притяжения капли к поверхности материала больше, чем силы собственного межмолекулярного взаимодействия, капиллярное давление  $p_2$  меньше атмосферного и капля втягивается внутрь капилляра. Чем больше перепад давлений, тем быстрее и глубже жидкость проникает в толщу материала. При этом капиллярное давление

$$p_2 = 2\sigma / R, \quad (7.2.2)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;

$R$  – радиус кривизны мениска.

Следовательно, уменьшение поверхностного натяжения воды увеличивает глубину пропитки и, соответственно, площадь ее контакта с поверхностью. Это повышает тушащую эффективность воды.

## 7.2.2. Механизм огнетушащего действия воды

Согласно тепловой теории, пламенное горение прекращается, когда температура пламени снижается до температуры потухания. Вода является веществом преимущественно охлаждающего действия.

При этом вода в зависимости от размера капель может:

- полностью испаряться в пламени, охлаждая только объем зоны горения;
- частично испаряться в пламени, охлаждая и объем зоны горения, и поверхность горючего;
- практически не взаимодействовать с пламенем, оказывая чисто поверхностное действие.



На практике применяются два основных способа подачи огнетушащих веществ: в объем зоны горения (тушение «по объему») и на поверхность горючего (тушение «по поверхности»).

При объемном тушении вода оказывает охлаждающее действие на зону горения, которое складывается из трех составляющих: теплоотвода на нагрев воды до  $T_{\text{кип}}$ ; затрат тепла пламени на испарение воды; отвода тепла образовавшимся паром, который нагревается до температуры потухания. Таким образом, при объемном тушении теоретический охлаждающий эффект воды  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/л, находится по формуле

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r_v + c_p^{\text{пара}}(T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}), \quad (7.2.3)$$

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

К охлаждающему действию воды в этом случае добавляется разбавляющий эффект водяного пара – при полном ее испарении из 1 л образуется 1 720 л пара. В результате этого в газовой фазе уменьшается концентрация горючего и окислителя, что, в соответствии с тепловой теорией потухания, ведет к снижению температуры пламени.

При охлаждении поверхности теоретический теплоотвод определяется выражением

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r_v. \quad (7.2.4)$$

При  $T_0 = 20$  °С,  $Q_{\text{охл}} = 4,2(100 - 20) + 2260 = 2596$  кДж/л. В расчетах принимается  $Q_{\text{охл}} = 2600$  кДж/л.

Соотношение процессов объемного и поверхностного тушения зависит от размеров капель воды.

Рассмотрим процесс испарения капли воды в факеле пламени при следующих допущениях. Будем считать, что капля имеет сферическую форму, сначала нагревается до температуры кипения, а затем полностью испаряется. При этом размеры капли во время нагрева не изменяются. Переменной величиной на этой стадии является температура капли. Во время испарения, наоборот, – температура является постоянной, а радиус капли уменьшается до 0. Изменением теплопроводности при образовании вокруг капли пленки пара пренебрегаем.

Введем обозначения:

$\tau_k$  – время существования капли;

$\tau_n$  – время нагрева до температуры кипения;

$\tau_{\text{и}}$  – время испарения;

$r_0$  – начальный радиус капли;

$T_{\text{ф}}$  – средняя температура зоны горения;

$T_0$  – начальная температура воды;

$T_k$  – температура кипения воды.

Согласно принятой модели, время существования капли в потоке газообразных продуктов горения  $\tau_k = \tau_n + \tau_{\text{и}}$ .

Количество тепла  $Q_{\text{нагр}}$ , которое получит капля, нагреваясь от  $T_0$  до  $T_k$ , определяется известным выражением

$$Q_{\text{нагр}} = mc_{\text{в}}(T_k - T_0) \quad (7.2.5)$$

или

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} (T_k - T_0), \quad (7.2.6)$$

где  $m$  – масса капли;

$c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды в интервале 0–100 °С;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды.

Изменение количества тепла, аккумулированного каплей в процессе нагревания, описывается уравнением

$$q_{\text{нагр}} = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \frac{dT}{d\tau}. \quad (7.2.7)$$

Процесс теплопередачи от слоя газа, имеющего температуру  $T_{\text{ф}}$ , через сферическую поверхность капли описывается законом Ньютона:

$$q = 4\pi r_0^2 \alpha (T_{\text{ф}} - T), \quad (7.2.8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Время нагрева капли до температуры кипения  $\tau_{\text{н}}$  можно найти из уравнения теплового баланса:

$$\frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \frac{dT}{d\tau} = 4\pi r_0^2 \alpha (T_{\text{ф}} - T). \quad (7.2.9)$$

После соответствующих преобразований, разделив переменные, получим выражение для интегрирования:

$$\frac{r_0 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}}{\alpha} \int_{T_0}^{T_k} \frac{dT}{T_{\text{ф}} - T} = \int_0^{\tau_{\text{н}}} d\tau. \quad (7.2.10)$$

Отсюда

$$\tau_{\text{н}} = \frac{1}{3} \frac{r_0 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}}{\alpha} \ln \frac{T_{\text{ф}} - T_0}{T_{\text{ф}} - T_k}. \quad (7.2.11)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  можно выразить как функцию коэффициента теплопроводности газа  $\lambda$  и числа Рейнольдса [4, 18]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{r_0} (1 + 0,32 \text{Re}^{2/3}). \quad (7.2.12)$$

Анализ этой формулы показывает, что при температуре газового потока от 800 до 1200 °С с увеличением скорости движения капли в 150 раз (с 0,1 до 15 м/с) значение  $\alpha$  изменяется от  $1,15(\lambda / r_0)$  до  $1,40(\lambda / r_0)$ . Можно считать, что  $\alpha \approx \lambda / r_0$ . Тогда формула (7.2.11) приобретает вид:

$$\tau_{\text{н}} = \frac{1}{3} \frac{r_0^2 \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}}{\lambda} \ln \frac{T_{\text{ф}} - T_0}{T_{\text{ф}} - T_k}. \quad (7.2.13)$$

Определим время испарения капли при  $T = T_k$ . Согласно принятой модели, капля, нагретая до  $T_k$ , начинает интенсивно испаряться под действием внешнего теплового потока. Количество тепла, переданное капле за бесконечно малый отрезок времени  $d\tau$ , равно:

$$dQ = 4\pi r^2 \alpha (T_\phi - T_k) d\tau. \quad (7.2.14)$$

Это тепло затрачивается на испарение внешнего слоя капли толщиной  $dr$ , масса которого

$$dm = 4\pi r^2 \rho_B dr = \frac{dQ}{r_B}, \quad (7.2.15)$$

где  $r_B$  – удельная теплота парообразования воды.

Подставив формулу (7.2.14) в выражение (7.2.15), после несложных преобразований получим:

$$d\tau = \frac{\rho_B r_B}{\alpha (T_\phi - T_k)} dr. \quad (7.2.16)$$

Здесь также  $\alpha \approx \lambda / r$ . Отсюда:

$$d\tau = \frac{\rho_B r_B}{\lambda (T_\phi - T_k)} r dr. \quad (7.2.17)$$

После интегрирования данного выражения в пределах  $\tau = 0$ ;  $r = r_0$  и  $\tau = \tau_n$ ;  $r = 0$  получим:

$$\tau_n = \frac{\rho_B r_B r_0^2}{2\lambda (T_\phi - T_k)}. \quad (7.2.18)$$

Параметры в формулах (7.2.13) и (7.2.18) имеют следующие единицы измерения:

время  $\tau_n$  и  $\tau_n$  – с;

радиус капли  $r_0$  – мм;

плотность воды  $\rho_B$  – кг/м<sup>3</sup>;

удельная теплоемкость воды  $c_B$  – Дж/(кг·град);

удельная теплота парообразования  $r_B$  – Дж/кг;

коэффициент теплопроводности газа  $\lambda$  – Вт/(м<sup>2</sup>·град);

температура  $T_\phi$  и  $T_k$  – °С.

Сложив формулы (7.2.13) и (7.2.18), получим формулу для оценки времени существования капли в зоне горения:

$$\tau_k = \frac{r_0^2 \rho_B}{\lambda} \left[ \frac{c_B}{3} \ln \frac{T_\phi - T_0}{T_\phi - T_k} + \frac{r_B}{2(T_\phi - T_k)} \right]. \quad (7.2.19)$$

Оценим время жизни капли диаметром 100 мкм при следующих исходных данных:  $T_\phi = 900$  °С;  $T_k = 100$  °С;  $T_0 = 20$  °С;  $\rho_B = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_B = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·град);  $\lambda^{900 \text{ °С}} = 0,10$  Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $r_B = 2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг. Начальный радиус данной капли  $r_0 = 50$  мкм =  $5 \cdot 10^{-5}$  м (диаметр 100 мкм).

Подставив эти данные в формулу (7.2.19), получим:

$$\tau_k = \frac{(5 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 1000}{0,1} \left( \frac{4,2 \cdot 10^3}{3} \ln \frac{880}{800} + \frac{2,26 \cdot 10^6}{2 \cdot 800} \right) = 0,038 \text{ с.}$$

Результаты расчета времени жизни каплей разного диаметра при тех же исходных данных приведены на рис. 7.2.5.

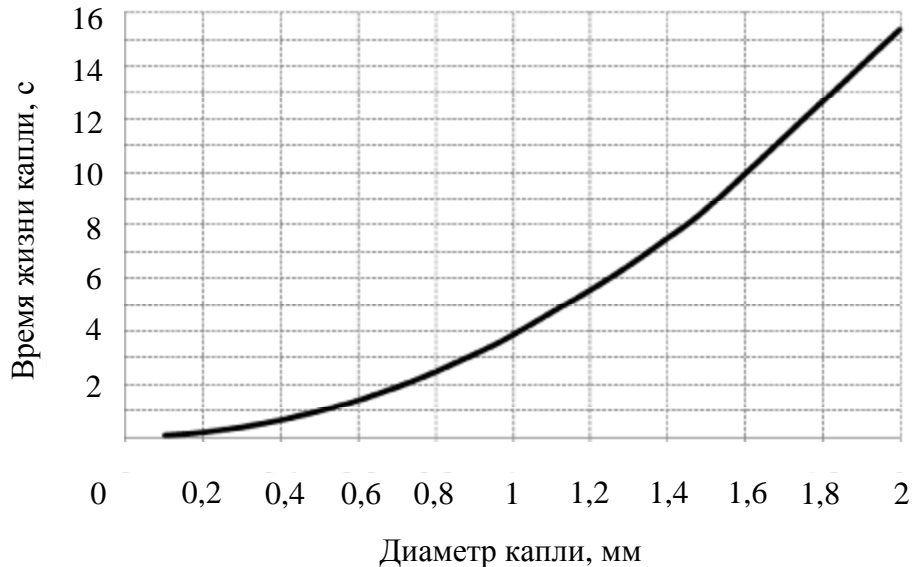


Рис. 7.2.5. Зависимость времени существования капли воды в факеле пламени от ее диаметра

Размер капли должен подбираться в зависимости от решаемой задачи. Так, при объемном тушении капля должна иметь запас энергии, достаточный для преодоления аэродинамического сопротивления потока газа, и полностью испариться в зоне горения. В случае тушения конденсированного горючего капля должна успеть пройти через факел пламени и испариться на поверхности твердого материала или в прогретом слое жидкости.

Согласно существующей классификации, струя воды, в которой преобладают капли диаметром до 100 мкм (0,1 мм), считается тонкораспыленной. Струя, в которой основная масса капель имеет диаметр более 100 мкм, считается распыленной.

Время, за которое капля воды пролетит расстояние от распылителя до поверхности горючего, зависит от ее начальной скорости. Допустим, расстояние до поверхности составляет 2 м; скорость истечения воды из сопла варьируется от 15 до 25 м/с. Если пренебречь уменьшением размера капли в результате испарения и сопротивлением встречного потока газа, то минимальное время пребывания в пламени составит 0,08–0,13 с.

Из рассмотренного примера следует, что капли диаметром менее 150 мкм живут менее 0,04 с и полностью испаряются в зоне горения. Более крупные капли испаряются частично и успевают достичь поверхности. Капли диаметром более 3 мм практически не испаряются в зоне горения.

Поведение капли воды на поверхности горючего зависит от природы этой поверхности и ее температуры. На поверхности жидкости капли воды не задерживаются. За счет более высокой плотности они проваливаются в слой горючего, быстро теряют свою начальную скорость и падают с постоянной скоростью, которая зависит от вязкости среды и радиуса капли. Если температура прогретого слоя жидкости выше температуры кипения воды (порядка 110–140 °С), вокруг капли образуется пленка пара, резко уменьшающая теплоотдачу и, соответственно, скорость испарения. В этом случае значительная часть капель проваливается через прогретый слой, не успевая испариться. Такая вода является потерянной.

Характер взаимодействия воды с твердым, нерастворимым в ней, материалом зависит от температуры его поверхности и дисперсности струи. На рис. 7.2.6 приведена характерная зависимость времени испарения одиночной капли воды от температуры поверхности [19].

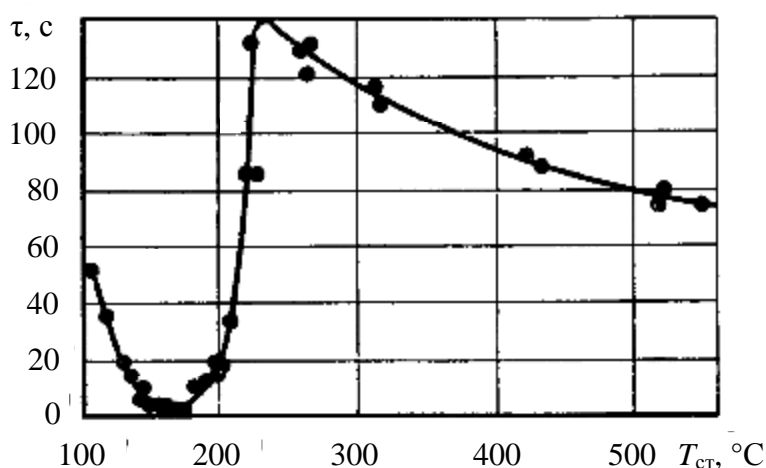


Рис. 7.2.6. Зависимость времени испарения капли воды от температуры поверхности ( $r_0 \approx 2$  мм) [19]

Из этого графика следует, что по мере охлаждения поверхности скорость испарения существенно изменяется. В первый момент она снижается – время жизни капли возрастает. Затем скорость испарения резко увеличивается – время испарения падает до 0. При дальнейшем охлаждении поверхности скорость испарения снова уменьшается – время жизни капли возрастает. Процессы смачивания и растекания воды по поверхности происходят при температурах ниже температуры кипения.

Все это объясняется изменением характера кипения жидкости. Существует два основных режима кипения: *пузырьковое*, когда пар образуется в виде отдельных пузырьков вокруг центров парообразования, находящихся на поверхности, и *пленочное*, когда жидкость отделена от поверхности слоем пара.

Пузырьковый режим кипения наблюдается при температурах поверхности 109–170 °С. В этом интервале испарение происходит при непрерывном контакте воды с нагретой поверхностью. При 170–270 °С между поверхностью и каплей или струей воды формируется пленка пара. Данный эффект был открыт и описан в 1750 году Лейденфростом. При этом струя воды дробится на капли, которые стремятся принять форму сферы. Пленка пара вокруг капли сокращает приток к ней тепла, тем самым увеличивая время испарения. Мелкие капли периодически соприкасаются с поверхностью, крупные – скользят по паровой подушке. При температурах выше 270 °С (в литературе это значение называется точкой Лейденфроста) вода полностью находится в сфероидальном состоянии, каждая капля обволакивается пленкой пара и с поверхностью не контактирует.

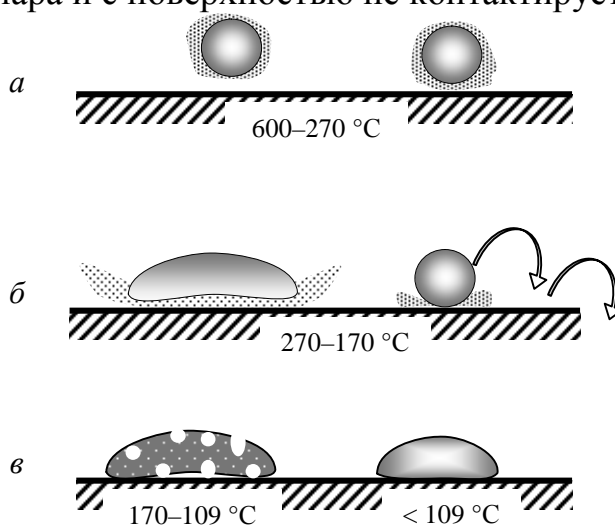


Рис. 7.2.7. Состояние воды при различных температурах охлаждаемой поверхности:  
*a* – дробление струи на отдельные капли;  
*б* – периодический контакт капель с поверхностью;  
*в* – пузырьковое кипение и непосредственный контакт капель с поверхностью

Таким образом, струя воды, подаваемая на тушение, при контакте с твердой поверхностью, имеющей температуру 600–270 °С, сначала дробится на более мелкие части и отдельные капли, которые с поверхностью не контактируют (рис. 7.2.7, *a*). Процесс теплопередачи при этом идет через пленку пара.

По мере охлаждения поверхности, при температурах 270–170 °С, мелкие капли периодически касаются поверхности и отбрасываются от нее паром. Крупные капли скользят по паровой подушке. При этом на горизонтальной поверхности они растекаются и медленно испаряются, а с вертикальной – быстро соскальзывают. Чем ниже температура, тем тоньше паровая прослойка и соответственно меньше время испарения капель (см. рис. 7.2.7, *б*).

При 170–109 °С прекращается образование пленки пара, вода вскипает непосредственно на поверхности – капли испаряются практически

мгновенно (см. рис. 7.2.7, в). Охлаждение поверхности до температур ниже 109 °С приводит к уменьшению интенсивности теплопередачи; время испарения капля воды возрастает – вода дольше удерживается на поверхности. При температурах ниже температуры кипения вода начинает смачивать обугленную поверхность, впитываться в поры и трещины.

Следует отметить, что при повышенных температурах смачивающая способность воды, как и других жидкостей, больше, так как меньше поверхностное натяжение (рис. 7.2.8).

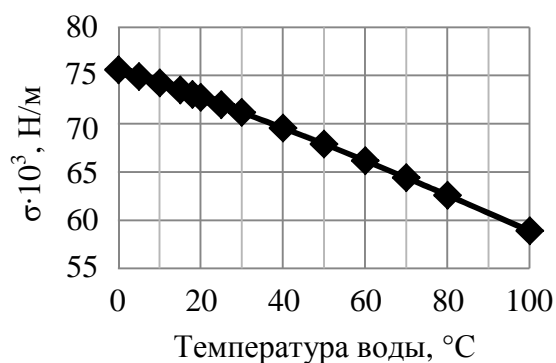


Рис. 7.2.8. Зависимость поверхностного натяжения воды от температуры

В настоящее время при тушении пожаров используются два способа подачи воды – в виде *компактных* и *распыленных струй*. Компактная струя из пожарного ствола представляет собой сплошной поток воды, имеющий высокую скорость. Эти струи имеют большой запас энергии и обладают определенной ударной силой, позволяющей срывать пламя. При этом большая масса воды воздействует на малую площадь. В этом достоинство и одновременно недостаток компактных струй. Большой запас энергии позволяет подавать воду на большие расстояния, а сравнительно малая площадь воздействия снижает коэффициент использования. В результате материальный и экологический ущерб от тушения может превысить ущерб от самого пожара.

Компактные струи целесообразно применять в тех случаях, когда требуется подать воду на большие расстояния или придать ей большую ударную силу. Это, например, тушение газовых фонтанов, большинство открытых пожаров твердых горючих материалов, охлаждение стен соседних с горящим объектом сооружений и т. п. Данный способ тушения является наиболее простым и потому наиболее распространенным.

Распыленная струя – это поток воды, состоящий из отдельных капель. Такие струи обладают небольшой энергией и дальностью полета. Однако единица массы распыленной воды орошает бóльшую площадь, чем такое же количество компактной. Кроме того, распыленная струя может активно воздействовать непосредственно на зону горения.

## 7.2.3. Параметры тушения водой

### 7.2.3.1. Прекращение горения газовых фонтанов

Механизм прекращения горения газовых фонтанов водой включает несколько процессов. Главными из них можно считать охлаждение зоны горения, разбавление зоны горения парами воды, нарушение устойчивости факела.

Согласно тепловой теории потухания прекращение горения наступает в результате понижения температуры пламени до некоторой критической величины, называемой *температурой потухания*  $T_{\text{пот}}$ . Это достигается путем увеличения интенсивности теплоотвода от зоны горения и (или) уменьшения интенсивности тепловыделения за счет снижения скорости реакции горения.

В результате попадания воды в зону горения часть тепла химической реакции начинает затрачиваться на нагрев, испарение воды и нагрев образующегося пара. В этом заключается механизм охлаждения зоны горения. Вместе с тем появление нейтрального газа (каким является водяной пар) уменьшает концентрацию молекул горючего и окислителя в зоне горения, т. е. приводит к ее разбавлению. Кроме того, присутствие воды изменяет распределение скоростей по сечению газовой струи, а также снижает нормальную скорость распространения пламени. В результате нарушается устойчивость факела, что в ряде случаев приводит к срыву пламени.

Уравнение теплового баланса пламени имеет вид:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{з.г}} + q_{\text{луч}}, \quad (7.2.20)$$

где  $q_{\text{п}}$  – интенсивность выделения тепла в зоне горения;

$q_{\text{з.г}}$  – интенсивность накопления тепла в зоне горения;

$q_{\text{луч}}$  – интенсивность отвода тепла из зоны горения излучением.

Температура пламени непосредственно определяется величиной  $q_{\text{з.г}}$ :

$$q_{\text{з.г}} = q_{\text{п}} - q_{\text{луч}}. \quad (7.2.21)$$

Величину  $q_{\text{луч}}$  можно выразить как долю потерь тепла от  $q_{\text{п}}$ , называемую *коэффициентом излучения*, обозначим его  $f$ . Тогда

$$q_{\text{з.г}} = q_{\text{п}} - fq_{\text{п}}$$

или

$$q_{\text{з.г}} = (1 - f)q_{\text{п}}. \quad (7.2.22)$$

Интенсивность теплоотвода от зоны горения, требуемую для охлаждения зоны горения до  $T_{\text{пот}}$ , также выразим как долю от  $q_{\text{п}}$ , которую обозначим  $k$ .

Согласно тепловой теории, адиабатическая температура потухания кинетического пламени определяется выражением:

$$T_{\text{пот}} = T_{\text{г}} - \frac{3RT_{\text{г}}^2}{E}, \quad (7.2.23)$$



где  $T_r$  – адиабатическая температура горения, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·град);

$E$  – энергия активации химической реакции, кДж/моль.

Однако горение реальных газовых фонтанов является диффузионным, т. е. характеристики процесса определяются главным образом скоростью взаимной диффузии горючего и окислителя, а не скоростью химических реакций между ними. Значения энергии активации реакций горения в таких условиях отсутствуют. В данной ситуации за температуру потухания можно принять температуру горения смеси, в которой содержание горючего равно нижнему концентрационному пределу распространения пламени  $T_r^H$ .

Допустим, что максимальная температура факела равна температуре горения смеси стехиометрического состава  $T_r^{CT}$ . Тогда количество тепла, которое необходимо отвести от пламени, будет пропорционально разности  $\Delta T = T_r^{CT} - T_r^H$ . Отношение  $\Delta T / (T_r^{CT} - T_0)$  составит величину  $k$ . Так как при расчетах адиабатических температур горения и потухания принимается  $T_0 = 0$  °С (273 К),  $k = \Delta T / T_r^{CT}$ .

Таким образом, требуемая интенсивность теплоотвода  $q_{отв}^{TP}$  с учетом выражения (7.2.22) будет равна:

$$q_{отв}^{TP} = (1 - f) k q_{п}. \quad (7.2.24)$$

Интенсивность тепловыделения рассчитывается по формуле

$$q_{п} = V_r Q_H \beta, \quad (7.2.25)$$

где  $V_r$  – секундный расход горючего газа, м<sup>3</sup>/с;

$Q_H$  – низшая теплота сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коэффициент полноты сгорания.

Коэффициент  $f$  зависит от состава горючего газа. В общем случае его значение можно оценить по выражению

$$f = 0,048 \sqrt{\sum M_i a_i}, \quad (7.2.26)$$

где  $M_i$  и  $a_i$  – молярная масса и объемная доля  $i$ -го горючего газа в смеси.

Адиабатическую температуру горения  $T_r^{CT}$  (то есть при  $\alpha = 1$ ) находят методом последовательных приближений или оценивают по формуле [2, с. 63]:

$$T_r^{CT} = T_0 + \frac{Q_H}{\sum c_{p_i} V_{п.г_i}}, \quad (7.2.27)$$

где  $c_{p_i}$  – удельная теплоемкость при 1 500 К;

$V_{п.г_i}$  – количество соответствующего компонента, найденное по уравнению реакции горения при  $\alpha = 1$ .

Температуру горения  $T_{\Gamma}^H$  при концентрации горючего равной нижнему концентрационному пределу распространения пламени определяют аналогично, но с учетом избытка воздуха [8, с. 233]:

$$T_{\Gamma}^H = T_0 + \frac{Q_H}{\sum c_{p_i} V_{п.г_i} + c_p^{возд} \Delta V_B}, \quad (7.2.28)$$

где  $c_p^{возд}$  – удельная теплоемкость воздуха при 1500 К;

$\Delta V_B = V_B^0 (\alpha_H - 1)$  – избыток воздуха ( $V_B^0$  – теоретический объем воздуха;  $\alpha_H$  – коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе распространения пламени).

Коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе распространения пламени  $\alpha_H$  равен:

$$\alpha_H = \frac{100 - \varphi_H}{\varphi_H V_B^0}. \quad (7.2.29)$$

С использованием формул (7.2.27)–(7.2.28) находится коэффициент  $k$  как отношение  $(T_{\Gamma}^{ст} - T_{\Gamma}^H) / T_{\Gamma}^{ст}$ . Коэффициент полноты сгорания  $\beta$  для газов можно принять равным 0,9. Низшую теплоту сгорания находят по таблицам или рассчитывают по известным формулам.

Количество тепла  $Q_{охл}$ , которое способна отнять вода от зоны горения при полном ее испарении и нагреве паров воды до температуры потухания, рассчитывается по формуле (7.2.3).

Тогда при секундном расходе воды  $g_B$ , л/с, расчетная интенсивность отвода тепла (в кДж/с) от факела пламени будет равна:

$$q^{расч} = Q_{охл} g_B. \quad (7.2.30)$$

Требуемый секундный расход воды  $g_B^{треб}$ , л/с, составит:

$$g_B^{треб} = q^{расч} / Q_{охл} \frac{(1-f)k\beta Q_H^p V_{\Gamma}}{Q_{охл}}. \quad (7.2.31)$$

В действительности расход воды, обеспечивающий тушение газовых факелов, может быть как выше, так и ниже значения  $g_B^{треб}$ , найденного таким способом. Это зависит от скорости истечения газовой струи и способа подачи воды.

Существует два способа тушения газовых фонтанов водой – подачей воды извне лафетными стволами или автомобилями газовойдынного тушения (АГВТ) и закачкой воды в скважину.

Рассчитаем требуемые секундный  $g_B$  и удельный  $q_{уд}^0$  расходы воды для прекращения горения фонтана природного газа дебитом 3,0 млн м<sup>3</sup>/сут. Так как природный газ примерно на 98 % состоит из метана, примем  $Q_H = 806$  кДж/моль, что составляет  $806 \cdot 10^3 / 22,4 = 35982,0$  кДж/м<sup>3</sup>. Расход газа равен  $3 \cdot 10^6 / 86400 = 34,7$  м<sup>3</sup>/с.

Коэффициент излучения  $f = 0,048 \sqrt{16} = 0,20$ . Расчетная адиабатическая температура горения метана  $T_{\Gamma}^{\text{ст}} = 2043 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , потухания –  $T_{\Gamma}^{\text{н}} = 1207 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент  $k = (2043 - 1207) / 2043 = 0,41$ .

Охлаждающий эффект воды (см. формулу (7.2.3))

$$Q_{\text{охл}} = 4,2(100 - 20) + 2260 + 2,14(1207 - 100) = 4965,0 \text{ кДж/л.}$$

При данных условиях требуемый секундный расход составит:

$$g_{\text{в}}^{\text{треб}} = (1 - 0,2)0,41 \cdot 34,7 \cdot 35982 \cdot 0,9 / 4965 = 74,0 \text{ л/с.}$$

Теоретический удельный расход

$$q_{\text{уд}}^0 = g_{\text{в}}^{\text{треб}} / V_{\Gamma} = 74 / 34,7 = 2,1 \text{ л/м}^3.$$

Сравним полученные результаты с нормативными данными. Например, для тушения лафетными стволами компактного фонтана дебитом 3 млн  $\text{м}^3/\text{сут}$ , выходящего из трубы диаметром 150 мм, требуется обеспечить секундный расход воды 120 л/с. Для тушения такого же фонтана закачкой воды в скважину – 30 л/с.

Фактический (нормативный) удельный расход при тушении лафетными стволами равен  $q_{\text{уд}} = 120 / 34,7 = 3,5 \text{ л/м}^3$ ; при тушении закачкой воды в скважину  $q_{\text{уд}} = 30 / 34,7 = 0,90 \text{ л/м}^3$ .

Коэффициент использования воды  $K_{\text{и}} = q_{\text{уд}}^0 / q_{\text{уд}}$ .

В первом случае  $K_{\text{и}} = 2,1 / 3,5 = 0,6$ . Во втором –  $K_{\text{и}} = 2,1 / 0,9 = 2,3$ . При тушении лафетными стволами степень полезного использования воды не превышает 60 %. При закачке воды в скважину она оказалась больше 100 %.

Такой парадоксальный результат можно объяснить следующим.

Вода, закачиваемая в скважину, захватывается турбулентным газовым потоком и диспергируется. Присутствие воды снижает скорость распространения пламени по газовой смеси. В результате зона отрыва поднимается, объем зоны горения уменьшается. Это приводит к уменьшению фактического тушащего расхода воды по сравнению с расчетным. При достижении определенной влажности газа скорость распространения пламени может быть ниже скорости истечения, что приведет к срыву пламени.

Потери воды зависят от скорости истечения. Чем ниже скорость истечения, тем меньше турбулентность потока газа и, соответственно, меньше степень дробления воды, закачиваемой в скважину. В результате этого крупные капли выпадают из струи газа, не достигая зоны горения, т. е. фактический теплоотвод меньше расчетного. Соответственно фактический расход воды будет больше расчетного. В этих случаях  $K_{\text{и}} < 1$ . С увеличением скорости истечения газа степень дробления воды в трубе возрастает, потери уменьшаются, фактический теплоотвод повышается,  $K_{\text{и}}$  возрастает. Кроме того, с увеличением турбулентности потока вода все больше препятствует формированию зоны отрыва, что приводит к срыву факела пламени. Поэтому при тушении газовых фонтанов закачкой воды в скважину реальный тушащий расход может быть меньше теоретического и  $K_{\text{и}} > 1$ .

### 7.2.3.2. Прекращение горения жидкостей

Первые сообщения о применении распыленной воды для тушения жидкостей, в частности нефти, в России появились в начале XX века. Исследования в этой области практически не прекращались. Вопросы тушения горючих жидкостей, в том числе водой, подробно рассмотрены в монографии [20].

Необходимым условием для тушения жидкости 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 и для тушения пожара.

Оценить требуемую интенсивность подачи воды в этом случае можно с помощью формулы (7.2.31). При этом вместо  $V_T$  берется удельная массовая скорость выгорания в  $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ; значение  $k_1$  можно принимать равным 0,3. Остальные параметры находятся так, как описано в п. 7.2.3.1.

Вместе с тем энергетически более выгодно прекратить горение жидкости, 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 прогретого слоя. Для жидкостей данное условие описывается следующим уравнением:

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_{\text{м}}^{\text{уд}} + Q_{\text{зап}} / \tau_{\text{т}}, \quad (7.2.32)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость жидкости,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$T_{\text{кип}}$  и  $T_{\text{всп}}$  – температура кипения и вспышки, соответственно,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$r$  – удельная теплота парообразования,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;

$v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания,  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;

$Q_{\text{зап}}$  – количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое,  $\text{кДж}/\text{м}^2$ ;

$\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Формула для расчета тепла, аккумулированного прогретым слоем жидкости, зависит от характера распределения в нем температуры. Если прогретый слой жидкости не является гомотермическим, распределение температуры в нем описывается уравнением

$$T_x - T_0 = (T_{\text{п}} - T_0) e^{-u_{\text{л}} x / a}, \quad (7.2.33)$$

где  $T_x$ ,  $T_{\text{п}}$ ,  $T_0$  – температура жидкости на глубине  $x$ , на поверхности и начальная, соответственно;

$u_{\text{л}}$  – линейная скорость выгорания, м/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Накопленный запас тепла определяется выражением

$$Q_x = \int_0^{\infty} c_{\text{ж}} \rho (T_x - T_0) dx, \quad (7.2.34)$$

где  $c_{\text{ж}}$  – удельная теплоемкость;

$\rho$  – плотность жидкости.

С учетом уравнения (7.2.33) получим:

$$Q_x = c_{\text{ж}} \rho (T_{\text{п}} - T_0) \int_0^{\infty} e^{-u_{\text{л}} x / a} dx. \quad (7.2.35)$$

После интегрирования данного выражения и замены  $a = \lambda / (c\rho)$  получим:

$$Q_x = \frac{\lambda}{u_{\text{л}}} (T_{\text{п}} - T_0). \quad (7.2.36)$$

Линейная скорость выгорания связана с массовой скоростью соотношением  $u_{\text{л}} = v_{\text{м}}^{\text{уд}} / \rho$ . Температура поверхности жидкости при горении быстро становится равной температуре кипения  $T_{\text{кип}}$ . Нижней температурной границей охлаждаемого слоя является температура вспышки  $T_{\text{всп}}$ . С учетом этого формула для определения количества тепла  $Q_{\text{зап}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, аккумулируемого прогретым слоем жидкости, приобретает вид:

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \quad (7.2.37)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К);

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Для жидкостей, в которых образуется гомотермический слой, величина  $Q_{\text{зап}}$  определяется выражением

$$Q_{\text{зап}} = c\rho (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) u_{\text{ГТС}} \tau, \quad (7.2.38)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·град);

$u_{\text{ГТС}}$  – скорость роста гомотермического слоя, м/ч;

$\tau$  – время горения, ч.

В формуле (7.2.38) произведение  $u_{ГТС}\tau$  равно толщине гомотермического слоя  $\delta_{ГТС}$ . Эта линейная зависимость справедлива для времени горения не более 1 ч. При более длительном горении [4]

$$\delta_{ГТС} = \delta_{\max} (1 - e^{-\mu\tau}), \quad (7.2.39)$$

где  $\delta_{\max}$  – максимальная толщина гомотермического слоя, м;

$\mu$  – коэффициент, зависящий от свойств жидкости и диаметра резервуара.

Если вода 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  $JQ_{\text{охл}}$ . Из уравнения (7.2.32) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_M^{\text{уд}}}, \quad (7.2.40)$$

где  $Q_{\text{охл}}$  – охлаждающий эффект воды, кДж/л.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель данной формулы обращается в 0, является критической. В этом случае  $\tau_T \rightarrow \infty$  и тушение становится невозможным. Из формулы (7.2.40) следует, что критическая интенсивность подачи воды  $J_{\text{кр}}$ , л/(с·м<sup>2</sup>), при таком способе тушения жидкости равна:

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}})]v_M^{\text{уд}}}{Q_{\text{охл}}}. \quad (7.2.41)$$

Возможность выполнения всех условий, необходимых и достаточных, при охлаждении прогретого слоя жидкости водой зависит от температуры вспышки. Чем больше температура вспышки по отношению к температуре воды, тем выше эффективность тушения. Учитывая, что вода при прохождении через факел пламени нагревается, охлаждение прогретого слоя будет доминирующим фактором, если температура вспышки жидкости не меньше 50 °С.

Коэффициент использования воды при тушении жидкостей охлаждением прогретого слоя зависит от полноты испарения капель в прогретом слое. При таком способе тушения вода, испарившаяся в факеле пламени, а также вода, не успевшая испариться в прогретом слое, является фактически потерянной. Экспериментально установлено, что для тушения керосина необходимо применять распыленную воду со средним диаметром капель порядка 300 мкм, трансформаторного масла и других высококипящих нефтепродуктов – 500 мкм.

### 7.2.3.3. Прекращение горения твердых горючих материалов

Гомогенное (пламенное) горение твердых горючих материалов (ТГМ) обусловлено образованием горючих газов в результате термического разложения вещества – пиролиза.

Для гомогенного горения необходимо, чтобы скорость выделения газообразных продуктов пиролиза и приток воздуха были достаточны для образования над поверхностью материала горючей смеси, т. е. смеси, в которой концентрация горючего газа не ниже НКПП.

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 несшитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Такие материалы, подобно жидкости, выгорают без остатка. Удельное количество тепла  $Q_{\text{зап}}$ , аккумулируемое в прогретом слое плавящихся материалов, определяется формулой (7.2.37).

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древесно-наполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, сшитые 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. Прогретый слой конденсированной фазы (твердого вещества или расплава) способен в течение некоторого времени поставлять нагретые продукты разложения 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.

Наиболее эффективным способом тушения ТГМ любого типа является принудительное охлаждение непосредственно поверхности горения. Время прекращения горения определяется интенсивностью теплоотвода от поверхности и тепловой инерцией прогретого слоя.

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:

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{треб}} = Q_{\text{пов}} + Q_{\text{зап}}, \quad (7.2.42)$$

где  $Q_{\text{отв}}$  – тепло, отводимое огнетушащим веществом от 1 м<sup>2</sup> поверхности, кДж/м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{пов}}$  – тепло, поступающее к поверхности, кДж/м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{зап}}$  – удельное теплосодержание прогретого слоя, кДж/м<sup>2</sup>;

здесь

$$Q_{\text{пов}} = q_{\text{вн}} \tau_{\text{т}}, \quad (7.2.43)$$

где  $q_{\text{вн}}$  – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения, кВт/м<sup>2</sup>;

$\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Если подаваемое огнетушащее вещество поступает к поверхности без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность, количество тепла, отбираемое за время  $\tau_{\text{т}}$  от 1 м<sup>2</sup> поверхности горения  $Q_{\text{отв}}$ , будет равно

$$Q_{\text{отв}} = J Q_{\text{охл}} \tau_{\text{т}}, \quad (7.2.44)$$

где  $J$  – интенсивность подачи, л/(с·м<sup>2</sup>) или кг/(с·м<sup>2</sup>);

$\tau_{\text{т}}$  – время подачи огнетушащего вещества, с.

Отсюда теоретическое, минимально возможное время тушения  $\tau_{\text{т}}$ , с, по механизму отвода тепла от поверхности:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}}. \quad (7.2.45)$$

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

При  $J \rightarrow \infty$  время тушения  $\tau_{\text{т}} \rightarrow 0$ . Однако минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего прогретого слоя  $\tau_0$ . Это физическое время определяется тепловой инерцией материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20 с.

Таким образом, теоретическое время прекращения горения  $\tau_{\text{т}}$ , с, при тушении по поверхности определяется по формуле

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0. \quad (7.2.46)$$

Графически зависимость (7.2.46) представляет собой гиперболу, заключенную между двумя асимптотами:  $\tau_{\text{т}} \rightarrow \tau_0$  при  $J \rightarrow \infty$  и  $\tau_{\text{т}} \rightarrow \infty$  при  $J \rightarrow J_{\text{кр}}$ . Вид этой зависимости показан на рис. 7.2.9.



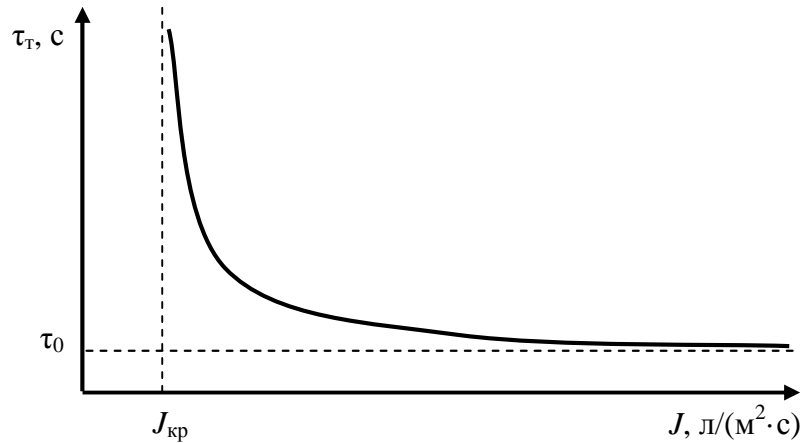


Рис. 7.2.9. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи

Умножив обе части (7.2.46) на  $J$ , получим выражение для удельного расхода  $q_{уд}$ , с:

$$q_{уд} \geq \frac{Q_{зап}}{JQ_{охл} - q_{вн}} J + \tau_0 J. \quad (7.2.47)$$

Из этого выражения следует, что зависимость  $q_{уд}$  от  $J$  может иметь экстремальную точку. Первое слагаемое данного выражения  $q_{уд}^1$  является гиперболой с асимптотами  $q_{уд}^1 \rightarrow \infty$  при  $J \rightarrow J_{кр}$  и  $q_{уд}^1 \rightarrow Q_{зап} / Q_{охл}$  при  $J \rightarrow \infty$ . Второе слагаемое представляет собой прямую  $q_{уд}^2 = \tau_0 J$ , где  $\tau_0$  является тангенсом угла ее наклона. Таким образом, величина  $\tau_0$  определяет крутизну правой ветви графика  $q_{уд} = f(J)$ . Чем меньше  $\tau_0$ , тем более пологой является правая ветвь кривой (рис. 7.2.10).

При некотором значении  $J$  удельный расход огнетушащего вещества становится минимальным.

Оптимальной является интенсивность подачи, при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества (см. рис. 7.2.10), находится дифференцированием уравнения (7.2.47) по  $J$ . Приравняв первую производную  $dq_{уд} / dJ$  к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи  $J_{опт}$ , л/(с·м<sup>2</sup>):

$$J_{опт} = \frac{1}{Q_{охл}} \left( \sqrt{\frac{Q_{зап} q_{вн}}{\tau_0}} + q_{вн} \right). \quad (7.2.48)$$

Значение  $\tau_0$  определяется не только тепловой инерцией углистого слоя, но и доступностью поверхности горения для огнетушащего вещества. Если площадь орошения  $S_{ор}$  струей больше или равна площади горения  $S_{п.г.}$ , значение  $\tau_0$  определяется условиями теплообмена капель воды с поверхностью. При  $S_{ор} < S_{п.г.}$  (тушение изделий с развитой поверхностью) значение  $\tau_0$  должно быть пропорционально коэффициенту поверхности.

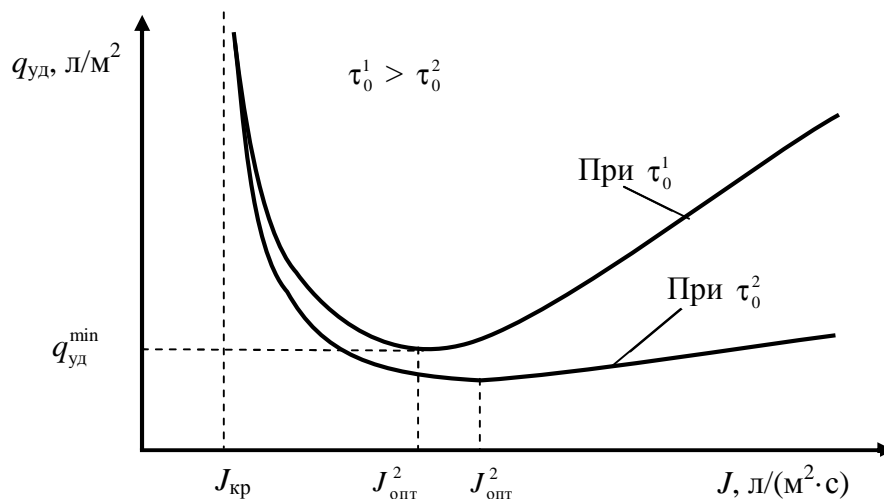


Рис. 7.2.10. Зависимость удельного расхода воды от интенсивности подачи при разных значениях  $\tau_0$

#### 7.2.3.4. Коэффициент использования воды при тушении твердых горючих материалов

При тушении любого пожара не вся подаваемая вода участвует в прекращении горения. Проведем количественную оценку коэффициента ее использования на примере тушения древесины.

Теоретический коэффициент использования  $K_{\text{и}}^0$  находится как отношение теоретического минимального удельного расхода огнетушащего вещества  $q_{\text{уд}}^0$  к фактическому  $q_{\text{уд}}$ :

$$K_{\text{и}}^0 = q_{\text{уд}}^0 / q_{\text{уд}}.$$

Найдем минимальное теоретическое значение удельного расхода  $q_{\text{уд}}^0$ , соответствующее оптимальной интенсивности подачи. Принимаем следующие допущения: горит одиночный термически толстый образец древесины; коэффициент поверхности  $K_{\text{п}} = 1$ ; горение протекает под действием излучения только собственного пламени; за время свободного горения образовался углистый слой предельной толщины, равный примерно 1 см; вода в распыленном виде подается равномерно на всю площадь поверхности горения; любые потери воды отсутствуют; интенсивность подачи равна оптимальной.

Для прекращения горения рассматриваемого образца интенсивность теплоотвода водой должна компенсировать тепловые потоки, поступающие к поверхности извне  $q_{\text{вн}}$  (в данном случае только от собственного пламени), изнутри (в данном случае тепловой эффект экзотермических реакций  $L_{\text{экз}}$ ), а также тепловой поток, аккумулируемый в пиролизованном слое  $q_{\text{зап}}$ , за вычетом конвективных потерь тепла  $q_{\text{конв}}$  (рис. 7.2.11).

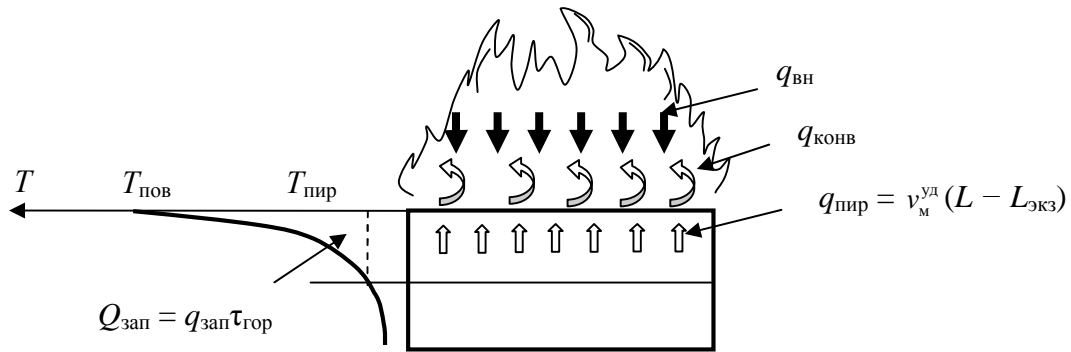


Рис. 7.2.11. Схема распределения тепловых потоков при горении одиночного образца древесины

Уравнение теплового баланса горения имеет вид:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} (L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \quad (7.2.49)$$

где  $q_{\text{вн}}$  – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м<sup>2</sup>;

$v_{\text{м}}^{\text{пр}}$  – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$L$  – теплота, затрачиваемая на пиролиз (газификацию) материала, кДж/кг;

$L_{\text{экз}}$  – экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза, кДж/кг;

$q_{\text{зап}}$  – тепловой поток, аккумулируемый в поверхностном слое;

$q_{\text{конв}}$  – конвективный тепловой поток, исходящий от поверхности, кВт/м<sup>2</sup>.

Так как в данном примере рассматривается горение одиночного образца со свободной поверхностью и  $K_{\text{п}} = 1$ , то  $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ .

Аккумулируемый тепловой поток  $q_{\text{зап}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, определяется выражением:

$$q_{\text{зап}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \quad (7.2.50)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость пиролизованного слоя, кДж/(кг·град);

$T_{\text{пов}}$  – температура поверхности при горении;

$T_{\text{пир}}$  – температура пиролиза.

Величина  $q_{\text{конв}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \quad (7.2.51)$$

где  $c_p$  – средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур  $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$ .

Удельный запас тепла  $Q_{\text{зап}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения, равен:

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \tau_{\text{гор}}, \quad (7.2.52)$$

где  $q_{\text{зап}}$  – тепловой поток, аккумулируемый пиролизующимся слоем, кВт/м<sup>2</sup>;

$\tau_{\text{гор}}$  – время свободного горения, с.

Отсюда

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}. \quad (7.2.53)$$

Теплота пиролиза  $L$  зависит от вида горючего материала. Значения теплоты пиролиза для некоторых ТГМ приведены в монографии [5]. 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.

Выражение для расчета массовой скорости выгорания  $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ , кг/(с·м<sup>2</sup>), получается из уравнения теплового баланса (7.2.49) после подстановки выражений (7.2.50) и (7.2.51):

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = \frac{q_{\text{вн}}}{L - L_{\text{экз}} + c(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) + c_p(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}})}. \quad (7.2.54)$$

Экспериментальное значение плотности теплового потока  $q_{\text{вн}}$ , падающего от собственного пламени, для древесины равно 24 кВт/м<sup>2</sup>;  $L = 2790$  кДж/кг;  $c = 1,47$  кДж/(кг·град);  $c_p = 3,1$  кДж/(кг·град);  $T_{\text{пов}} = 700$  °С;  $T_{\text{пир}} = 200$  °С. Тепловой эффект экзотермических реакций в пиролизующемся слое древесины  $L_{\text{экз}} = 0,06Q_{\text{н}}$ . Среднее значение  $Q_{\text{н}}$  древесины сосны составляет около 19000 кДж/кг [12]. Отсюда  $L_{\text{экз}} = 0,06 \cdot 19000 = 1140$  кДж/кг.

Подставив данные в выражение (7.2.54), получим  $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 0,0061$  кг/(с·м<sup>2</sup>). Тогда

$$q_{\text{конв}} = 0,0061 \cdot 3,1(700 - 200) = 9,50 \text{ кВт/м}^2;$$

$$Q_{\text{зап}} = [24 - 0,0061(2790 - 1140) - 9,5] \tau_{\text{гор}} = 4,4 \tau_{\text{гор}} \text{ кДж/м}^2.$$

Найдем значение  $\tau_{\text{гор}}$ , за которое толщина углистого слоя  $\delta$  становится равной 1 см. Линейная скорость продвижения его нижней границы  $u_{\text{л}} = 2,2 \cdot 10^{-2} q_{\text{вн}}$  (в мм/мин). Отсюда  $\tau_{\text{гор}} = 19,0$  мин. Таким образом, удельный запас тепла в охлаждаемом слое рассматриваемого образца  $Q_{\text{зап}} = 4,4 \cdot 19 \cdot 60 = 5016$  кДж/м<sup>2</sup>.

Удельный расход огнетушащего вещества равен произведению интенсивности подачи на время тушения. Отсюда  $q_{\text{уд}}^0 = J_{\text{опт}} \tau_{\text{т}}^{\text{опт}}$ .

Оптимальная интенсивность подачи воды (7.2.48):

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{2600} \left( \sqrt{\frac{5016 \cdot 24}{20}} + 24 \right) = 0,04 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2).$$

Время тушения при  $J = J_{\text{опт}}$  (7.2.46):

$$\tau_{\text{т}}^{\text{опт}} = \frac{5016}{0,04 \cdot 2600 - 24} + 20 = 83 \text{ с.}$$

Минимальный удельный расход:

$$q_{\text{уд}}^0 = 0,04 \cdot 83 = 3,3 \text{ л/м}^2.$$

Отметим, что это теоретический расход воды в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади поверхности горения. Сравним данное значение с фактическими расходами воды при тушении реальных пожаров.

В качестве примера рассмотрим пожар в квартире, в здании не ниже III степени огнестойкости. Основную горючую нагрузку в жилых помещениях составляют изделия из древесины или ДСП. Анализ показал, что примерно в 75–80 % случаев площадь пожара в таких зданиях не превышает 5 м<sup>2</sup>. На их тушение, как правило, подается один ствол с расчетным расходом воды  $g = 3,5$  л/с. Время работы ствола обычно не превышает 1 мин.

Фактический удельный расход при данных условиях равен

$$q_{уд} = \frac{g\tau_r}{S_{п}} = \frac{3,5 \cdot 60}{5} = 42 \text{ л/м}^2.$$

Исследования параметров горючей нагрузки жилых помещений, проведенные кафедрой «Процессы горения» Академии ГПС МЧС России, показали, что коэффициент поверхности в жилых помещениях  $K_{п} = 3 \div 5$ . Следовательно, удельный расход в расчете на 1 м<sup>2</sup> поверхности горения равен

$$q_{уд} = \frac{42}{K_{п}} = \frac{42}{3 \div 5} = 14 \div 8,4 \text{ л/м}^2.$$

Таким образом, условно теоретический (так как в жилище имеется много горючих материалов по свойствам отличных от древесины) коэффициент использования воды равен:

$$K_{и}^0 = \frac{q_{уд}^0}{q_{уд}} = \frac{3,3}{14 \div 8,4} = 0,20 \div 0,40.$$

Это означает, что в данном случае от 60 до 80 % поданной воды стекает с горячей поверхности, не успевая испариться. В значительной мере это объясняется особенностями контактирования воды с горячей поверхностью, рассмотренными выше в п. 7.2.2. Кроме того, на реальных пожарах условия горения существенно отличаются от принятых в рассмотренной модели. В частности, на открытых пожарах происходит взаимное переоблучение поверхностей горящих предметов (рис. 7.2.12).

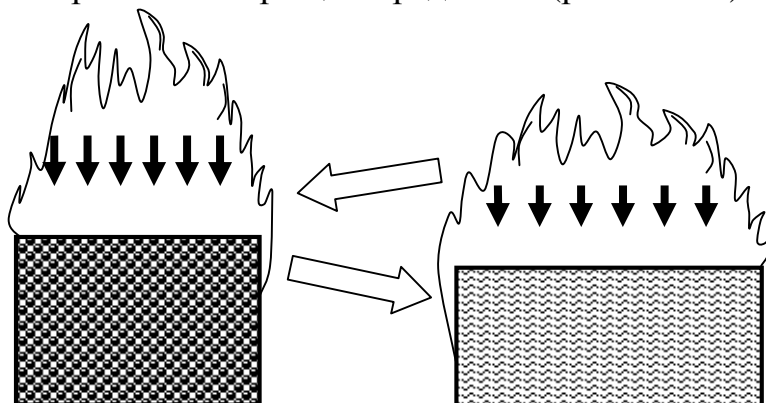


Рис. 7.2.12. Тепловое излучение на открытом пожаре:  
черные стрелки – излучение собственного пламени;  
светлые стрелки – излучение пламени соседнего предмета

Внутри помещений к этому добавляется излучение от припотолочного дымового слоя (рис. 7.2.13). Измеренный тепловой поток в жилом помещении достигает  $50 \text{ кВт/м}^2$ . Примерно такие же значения получены при оценке тепловых потоков внутри скрытых поверхностей предметов, выгорающих в гетерогенном режиме.

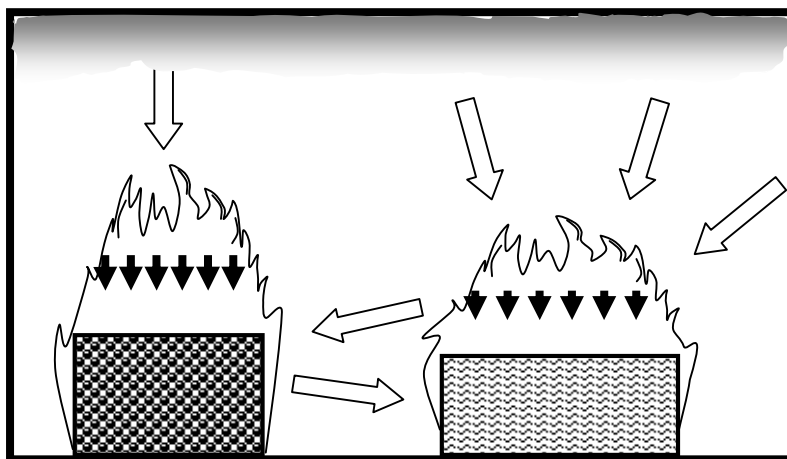


Рис. 7.2.13. Схема теплового облучения предметов при пожаре в помещении:  
 черные стрелки – излучение собственного пламени;  
 светлые стрелки – внешнее излучение

Эти факторы увеличивают  $q_{\text{вн}}$  и, соответственно,  $Q_{\text{зап}}$ . В результате при одной и той же интенсивности подачи возрастают время тушения и фактический удельный расход.

Кроме того, не всегда удастся подавать воду на скрытые участки поверхности. Чем больше коэффициент поверхности горючей нагрузки, тем больше скрытых участков, тем меньше реально орошаемая площадь по отношению к площади горения.

Определить теоретический коэффициент использования воды на большинстве потушенных реальных пожаров либо невозможно, либо крайне сложно. Это объясняется, прежде всего, неоднородностью горючей нагрузки. Кроме того, часто не известен ее состав.

Обработка данных по результатам тушения водой более 2000 пожаров площадью до  $600 \text{ м}^2$ , проведенная в нашей стране и за рубежом, показала, что фактический удельный расход существенно зависит от площади пожара. При этом зафиксированные значения удельного расхода при каждой площади пожара оказываются не ниже некоторого минимального значения (рис. 7.2.14).

Зависимость минимальных значений  $q_{\text{уд}}$  от площади пожара  $S_{\text{п}}$  описывается выражением  $\lg q_{\text{уд}}^{\text{min}} = 1,1 \lg S_{\text{п}} + 0,302$  [1]. С достаточной для практики точностью можно считать, что минимальный удельный расход воды

численно равен половине площади пожара:  $q_{уд}^{min} = 0,5S_{п}$ , л/м<sup>2</sup>. Таким образом, практический коэффициент использования воды определяется по формуле

$$K_{и} = 0,5S_{п} / q_{уд}. \quad (7.2.55)$$

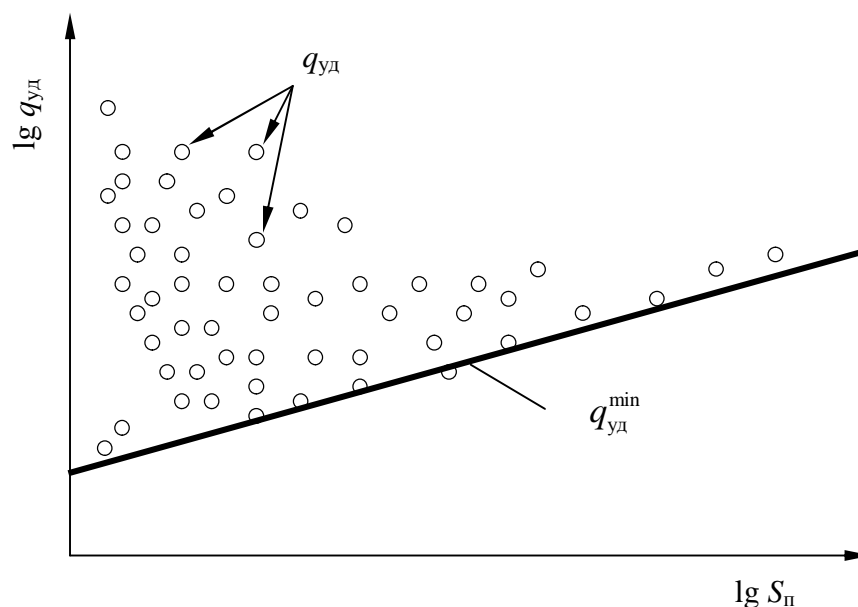


Рис. 7.2.14. Иллюстрация зависимости минимального фактического удельного расхода воды от площади пожара

### 7.2.3.5. Повышение коэффициента использования воды при тушении пожаров твердых горючих материалов

Известные в настоящее время способы повышения коэффициента использования воды при тушении ТГМ по основному механизму действия можно условно разделить на следующие группы:

- уменьшение внешнего теплового потока;
- увеличение площади орошения;
- повышение скорости пропитки углистого слоя;
- увеличение времени контакта воды с поверхностью ТГМ.

Способы, составляющие *первую группу*, фактически являются комбинированными, так как основаны на применении огнетушащих веществ с разными доминирующими механизмами действия.

В первую группу попадают способы объемного тушения. При тушении тлеющих ТГМ их применение часто оказывает лишь вспомогательное действие. Окончательное тушение в этих случаях достигается подачей воды или порошка класса АВС непосредственно на поверхность горения. Однако даже кратковременное уменьшение или ликвидация  $q_{вн}$  снижает

массовую скорость выгорания, скорость аккумуляирования тепла в прогретом слое. Все это в комплексе (см. выражения (7.2.54), (7.2.50), (7.2.52)) приводит к уменьшению времени прекращения горения (см. формулу (7.2.42)). Соответственно уменьшается фактический удельный расход воды. Наиболее эффективно эти способы реализуются в помещениях подачей порошков класса ВСЕ; огнетушащих аэрозолей; импульсной и непрерывной подачей тонкораспыленной воды и воды аэрозольного распыления (средний диаметр капель порядка 50 мкм).

Сюда же следует отнести подачу пены средней кратности на поверхности горящих предметов и материалов. Слой пены экранирует внешние тепловые потоки довольно продолжительное время. В этих случаях вода тратится в основном на проливку скрытых участков в ходе разборки.

*Вторую группу* составляют различные способы подачи распыленной воды. Основную сложность при этом составляет доставка воды непосредственно к поверхности горения.

Повышение скорости пропитки углистого слоя (*третья группа*) достигается применением добавок поверхностно-активных веществ. Это приводит к уменьшению поверхностного натяжения воды и увеличению глубины и скорости пропитки (см. п. 7.2.1). Разработаны и выпускаются специальные составы – смачиватели. Как правило, их основу составляют синтетические анионоактивные ПАВы. От пенообразователей они отличаются пониженной пенообразующей способностью.

В практике пожаротушения для этих целей используют чаще всего обычные пенообразователи как более универсальные. При этом создают рабочую концентрацию раствора, обычно равную половине необходимой для получения пены. Соответственно раствор подается водяными стволами.

Увеличение времени контакта воды с поверхностью ТГМ (*четвертая группа*) достигается применением добавок-загустителей – веществ, повышающих вязкость. С этой целью используют водорастворимые полимеры: карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ), полиэтиленоксид и др. В практике пожаротушения такие растворы применяются крайне редко, так как они предъявляют повышенные требования к обслуживанию оборудования.

Для увеличения огнетушащей способности воды также используют водные растворы неорганических солей – в основном диаммонийфосфата и мочевины. Их применяют для тушения лесных пожаров. Экспериментально установлено, что 10 %-ми водными растворами бикарбонатов натрия и калия, а также карбонатов натрия и калия можно тушить нефтепродукты, спирты, эфиры и другие жидкости, которые чистой водой потушить не удастся. Однако механизм действия этих добавок не изучен.



## Контрольные вопросы

1. Назовите основные теплофизические параметры воды.
2. Что такое антифризы? Какими свойствами они обладают?
3. В чем проявляется химическая активность воды?
4. В чем проявляется физическое взаимодействие воды с другими веществами?
5. Какой параметр служит характеристикой смачивающей способности воды?
6. В чем заключаются механизмы прекращения горения тушением «по объему» и «по поверхности»?
7. Из каких составляющих складывается теоретический охлаждающий эффект воды при тушении «по объему» и «по поверхности»?
8. Как протекает взаимодействие капли воды с поверхностью не растворимой в воде горючей жидкости?
9. Как протекает взаимодействие капли воды с поверхностью нагретого твердого тела?
10. В чем заключается физический смысл критической интенсивности подачи воды при тушении ТГМ?
11. Какая интенсивность подачи воды считается оптимальной?
12. Дайте определение коэффициента использования воды и назовите основные способы его увеличения.

## 7.3. Пены как огнетушащие вещества

### 7.3.1. Структура пен

Пена как огнетушащее вещество широко используется при тушении пожаров на объектах химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также используется для тушения твердых и жидких веществ, не вступающих во взаимодействие с водой.

Применение пены для тушения пожаров было предложено в 1904 году русским инженером А. Г. Лораном. Им получена химическая пена на основе водного раствора сернокислого алюминия и бикарбоната натрия с добавками в качестве пенообразователя солодкового экстракта. А. Г. Лоран высказал идею получения воздушно-механической пены и применения ее для тушения пожаров, однако реализовалась эта идея значительно позже.

Пена представляет собой дисперсную двухфазную систему, состоящую из пузырьков газа, окруженных пленками жидкости. Отношение объемов газовой и жидкой фаз (в единице объема) пены определяет структуру и ее свойства. Если объем газовой фазы  $V_g$  превышает объем жидкости  $V_{ж}$  не более чем в 10–20 раз, ячейки пены, заполненные газом, имеют сферическую форму. В таких пенах газовые пузыри окружены оболочками жидкости относительно большой толщины. Сферические пены отличаются высоким содержанием жидкости и в силу этого – малой устойчивостью. Поэтому их относят к метастабильным (условно стабильным). В нестабильных пенах наблюдается так называемый эффект Плато: жидкая фаза из перегородок удаляется, истекая под действием силы тяжести, и происходит быстрая коалесценция (от лат. *coalesce* – срастаюсь, соединяюсь) – слияние соприкасающихся газовых пузырьков. В пене газовый пузырек не может свободно перемещаться ни в вертикальной, ни в горизонтальной плоскости. Он как бы «зажат» другими, прилегающими к нему пузырьками. С увеличением отношения  $V_g / V_{ж}$  толщина пленки жидкости, разделяющая газовые объемы, уменьшается, а газовая полость утрачивает сферическую форму. Пены, у которых отношение  $V_g / V_{ж}$  составляет несколько десятков или даже сотен, имеют многогранную форму. Причем форма многогранников может быть различной – треугольные призмы, тетраэдры, неправильной формы параллелепипеды. В процессе старения пены шарообразная форма ячеек переходит в многогранную. Многогранные пены отличаются малым содержанием жидкой фазы и характеризуются высокой стабильностью. В таких пенах отдельные пузырьки сближены и разделены тонкими «растянутыми упругими пленками». Эти пленки в силу упругости и ряда других факторов препятствуют коалесценции газовых

пузырьков. По мере утончения разделительных пленок пузырьки все плотнее сближаются, прилегают друг к другу и приобретают четкую форму многогранников.

### 7.3.2. Способы получения пен

По способу образования пены подразделяют на химические, воздушно-механические. Химическая пена образуется при взаимодействии растворов кислот и щелочей в присутствии пенообразующего вещества и представляет собой концентрированную эмульсию диоксида углерода в водном растворе минеральных солей.

Для пожаротушения, как правило, используют воздушно-механические пены. Их получают в результате дробления и распределения воздуха или газа в растворе с пенообразователем. Обычно небольшие порции газа вводят в раствор и дробят их там до размеров мелких пузырьков. Легче всего этого добиться, продувая газ через трубку, опущенную в жидкость. Таким образом, могут быть получены монодисперсные пены (то есть пены, состоящие из пузырьков одинакового размера). Пену можно получить, барботируя воздух через жидкость, механическим перемешиванием, встряхиванием, взбиванием. Иногда орошают жидкостью металлическую сетку, через которую принудительно подают газ.

Применяют в основном две группы устройств. К *первой группе* относятся воздушно-пенные стволы, работающие по принципу соударения струй. Раствор пенообразователя под давлением выбрасывается из отверстий, расположенных под углом друг к другу, вследствие чего струи сталкиваются, дробятся и перемешиваются, захватывая воздух из окружающей среды. Пена, образующаяся в результате интенсивного перемешивания раствора и воздуха, выбрасывается через конструкцию, называемую стволом. Такая пена характеризуется низкой кратностью (кратность пены – это отношение объема пены к объему раствора пенообразователя, из которого пена получена) и неоднородностью структуры, поэтому она нестойка. Однако такие генераторы даже при небольших давлениях выбрасывают струю пены на дальние расстояния, что облегчает тушение больших очагов пожара.

В пеногенераторах *второй группы* вспенивание происходит на сетках. Раствор пенообразователя под давлением выбрасывается из распылителя, попадает в виде капель на ячейки сетки и смачивает их. При получении пен средней кратности для формирования пузырьков используется поток воздуха, эжектируемый струями раствора. Для получения пен высокой кратности воздух, как правило, подается принудительно вентилятором.

### 7.3.3. Параметры пен

Из одного и того же пенообразователя можно получить пену, обладающую различной огнетушащей эффективностью. Это зависит главным образом от ее параметров – кратности, дисперсности, вязкости, стойкости и др.

*Кратностью пены*  $K_{\text{п}}$  называется отношение объема пены  $V_{\text{п}}$  к объему раствора пенообразователя, из которого она получена  $V_{\text{раст.ПО}}$ :

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{раст.ПО}}}.$$

Это основная характеристика пен. По данному показателю пены делятся на низкократные –  $K_{\text{п}} = 4 \div 20$ , среднекратные –  $K_{\text{п}} = 21 \div 200$  и высокократные –  $K_{\text{п}}$  более 200. Системы с кратностью менее 4 относятся к пеноэмульсиям. При прочих равных условиях, чем выше кратность пены, тем больше изолирующая способность и меньше охлаждающая.

Пены низкой кратности рекомендуются в основном для тушения высококипящих горючих жидкостей и для тушения пожаров жидкостей в резервуарах, оборудованных установками подачи пены через слой горючего, так как их изолирующая способность невелика, а в механизме прекращения горения большую роль играет охлаждение. Пенами средней кратности, обладающими меньшими термической стойкостью и текучестью, но более высокими изолирующими способностями, можно осуществлять тушение легковоспламеняющихся горючих жидкостей (ЛВЖ) с низкой температурой кипения. Для объемного тушения в подвалах, кабельных каналах и т. п., как правило, используется пена высокой кратности.

*Дисперсность пены*  $D_{\text{п}}$  обратно пропорциональна среднему диаметру пузырьков  $d_{\text{ср}}$ :

$$D_{\text{п}} = \frac{1}{d_{\text{ср}}}.$$

Чем выше дисперсность, тем выше стойкость пены и огнетушащая эффективность. С повышением дисперсности пены ее кратность уменьшается. Степень дисперсности пены во многом зависит от условий ее получения, в том числе и от характеристики аппаратуры.

Кратность и дисперсность пены определяют изолирующую способность пены и ее текучесть. Скорость растекания пены тоже важный фактор при тушении пожара.

*Вязкость пены* влияет на текучесть пены и оценивается коэффициентом динамической вязкости  $\mu$ . В отличие от жидкости пена обладает свойствами упругого твердого тела. Внешне это проявляется в способности пены сохранять определенное время свою первоначальную форму.

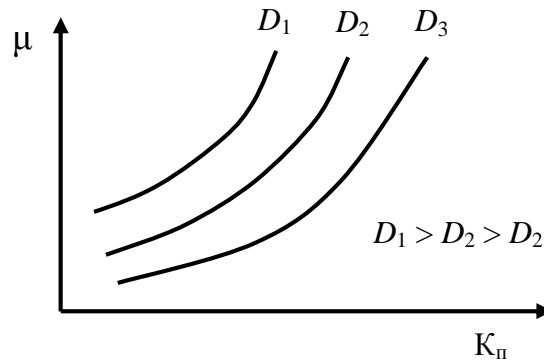


Рис. 7.3.1. Зависимость коэффициента динамической вязкости пены от ее кратности

Вязкость пены зависит от многих факторов и параметров, прежде всего от природы пенообразователя, кратности и дисперсности. Зависимость коэффициента динамической вязкости  $\mu$  пены при различных дисперсностях показана на рис. 7.3.1. Из рисунка видно, что коэффициент динамической вязкости пены повышается с увеличением ее кратности и дисперсности.

Высокой вязкостью обладают пены, имеющие меньшую скорость истечения жидкости. Со временем в процессе старения пены вязкость ее сначала увеличивается, а затем в зависимости от типа пенообразователя может оставаться постоянной или уменьшаться.

*Стойкость пены* – это обратная величина интенсивности выделения отсека с размерностью  $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ .

Стойкость пены  $S$  характеризуется ее сопротивляемостью процессу разрушения и оценивается продолжительностью выделения из пены 50 % жидкой среды, называемой *отсеком*. Любая замкнутая система, обладающая избытком свободной энергии, находится в неустойчивом равновесии, поэтому энергия такой системы всегда уменьшается. Этот процесс протекает до достижения минимального значения свободной энергии, при котором в системе наступает равновесие. Если система состоит, например, из жидкости и газа (что имеет место в пенах), то минимальное значение свободной энергии будет достигнуто тогда, когда поверхность раздела фаз окажется минимальной.

Пена, как и любая дисперсная система, является неустойчивой. Неустойчивость пены объясняется наличием избытка поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела фаз жидкость – газ. Следовательно, состояние равновесия пены будет достигнуто тогда, когда она превратится в жидкость и газ, т. е. прекратит свое существование. Поэтому применительно к пенам можно говорить лишь об относительной стойкости.

Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит в основном от температуры окружающей среды, дисперсности и толщины стенок пузырьков.

Толщина стенок пузырька –  $h_{ст}$ , его диаметр –  $d_{п}$  и кратность пены –  $K_{п}$  связаны зависимостью:

$$h_{ст} \sim \frac{d_{п}}{K_{п}}.$$

Стойкость пены зависит также от высоты пенного слоя. При увеличении высоты слоя пены уменьшается выделение жидкой фазы, следовательно, стойкость пены увеличивается.

Пены с большей кратностью менее термостойки. С повышением вязкости пены стойкость ее возрастает, но ухудшается растекаемость по горячей поверхности.

### 7.3.4. Механизм огнетушащего действия пен

Пены применяются для тушения как твердых, так и жидких горючих веществ. При этом пламенное горение прекращается в результате комплексного воздействия следующих основных механизмов.

*Изолирование зоны горения от поверхности горючего.* Механизм заключается в том, что слой пены, формируемый на поверхности, постепенно уменьшает поток горючего пара или газа в зону химических реакций. Это приводит к уменьшению концентрации горючего в ней и, согласно уравнению (6.3), к понижению интенсивности тепловыделения и, соответственно, температуры пламени. Когда слой пены достигает определенной толщины (зависящей от вида пенообразователя и горючего), температура пламени снижается до температуры потухания.

*Охлаждение поверхности* выделяющимся отсеком. Действие этого процесса также приводит к уменьшению концентрации горючего в зоне горения, но за счет снижения массовой скорости выгорания материала.

*Экранирование лучистого потока* от пламени к поверхности. Этот процесс, как и охлаждение, уменьшает скорость поступления горючих газов в зону химических реакций и в конечном счете температуру пламени.

*Разбавление зоны горения* водяным паром, образующимся при испарении отсека.

В настоящее время пены наиболее часто применяются для тушения жидкостей. При этом процесс формирования изолирующего слоя на поверхности жидкости протекает постепенно и носит комплексный характер (рис. 7.3.2).

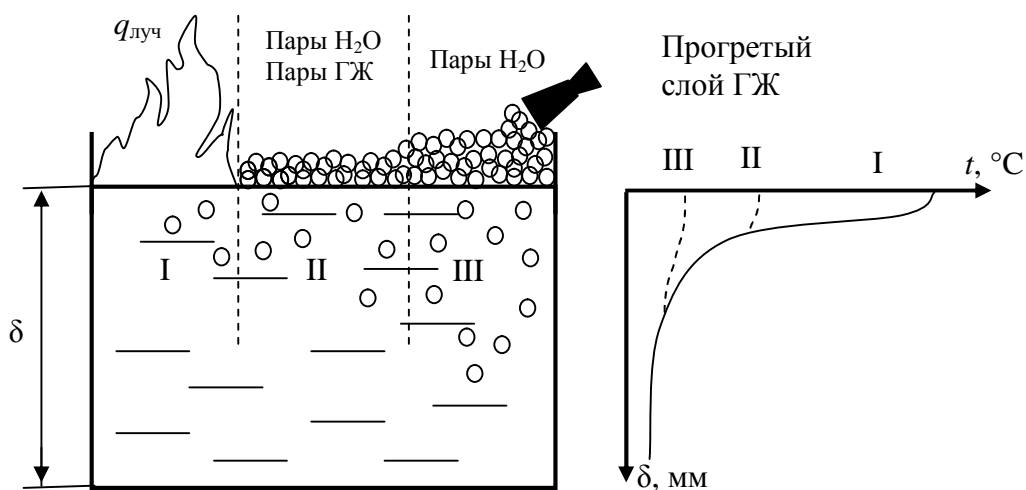


Рис. 7.3.2. Схема прекращения горения жидкости воздушно-механической пеной:  
 I – участок свободного горения; II – участок активного воздействия пены на процесс горения; III – участок, на котором горение прекращено;  
 $\delta$  – глубина горючей жидкости в резервуаре

1. При интенсивности подачи пены (подача объема пены на один квадратный метр площади в единицу времени), превышающей интенсивность ее разрушения, на поверхности ГЖ образуется сразу локальный слой пены, который охлаждает ГЖ выделяющимся из пены отсеком (жидкость, выделившаяся при разрушении пены). Охлаждение прогретого слоя ГЖ отсеком пены приводит к тому, что уменьшается скорость испарения ГЖ, вследствие этого уменьшается концентрация паров горючего в зоне горения, скорость химической реакции, скорость тепловыделения и, как конечный результат, температура горения.

2. Как только образуется локальный слой пены на поверхности ГЖ, он экранирует часть ГЖ от лучистого потока пламени и охлаждает верхний прогретый слой. Уменьшается концентрация паров горючего в зоне горения, снижается скорость окисления, снижается и температура горения.

3. При достижении на поверхности жидкости слоя пены определенной толщины прекращается поступление выделяющихся паров ГЖ в зону горения. Следовательно, пена изолирует горючую жидкость от зоны горения – горение прекращается.

Пары воды, выделившейся из пены при ее разрушении, попадают в зону горения, при этом они снижают концентрацию горючего в объеме зоны горения, а также охлаждают эту зону.

### 7.3.5. Виды разрушения пен

Результат тушения достигается за определенное время. В процессе тушения пена разрушается. Обычно рассматривают следующие виды

разрушения пен: *термическое* – под действием тепловых потоков от факела пламени и нагретой жидкости; *контактное* – в результате проникновения жидкости в структуру пены; *гидростатическое* (синерезис). При термическом разрушении происходит разрыв стенок пузырьков из-за расширения заключенного в них нагретого газа. Причинами контактного разрушения являются взаимная растворимость пенообразующего раствора и горючей жидкости, в результате втягивания жидкости в места пересечения пузырьков пены – «каналы Плато – Гиббса» – за счет пониженного давления в них (рис. 7.3.3), в результате капиллярных явлений. Гидростатическое разрушение (обезвоживание) происходит за счет истечения раствора из пенной структуры под действием силы тяжести (сил гравитации).

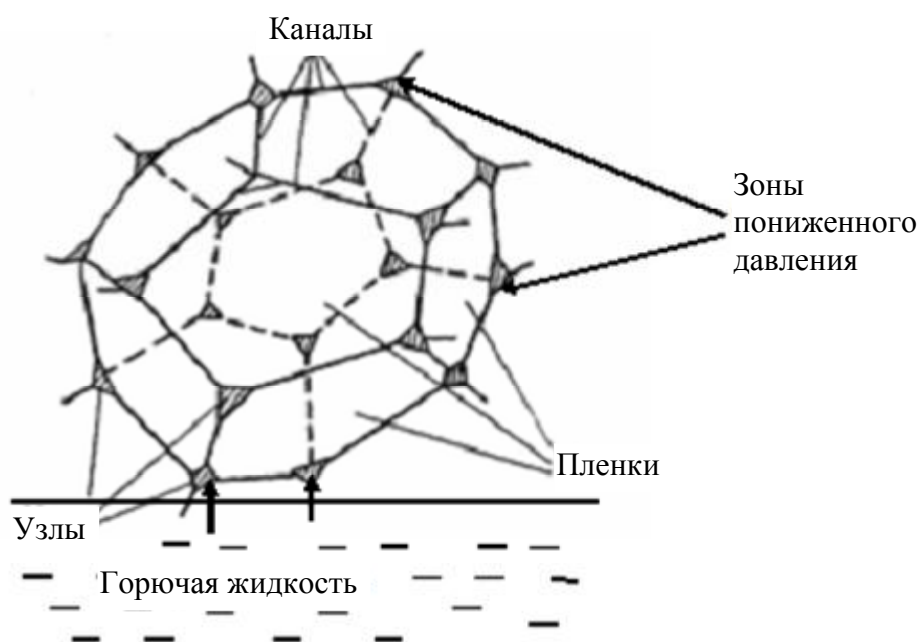


Рис. 7.3.3. Схема образования зон пониженного давления – «каналы Плато – Гиббса»

Существует три основных процесса, приводящие к разрушению пены:

- перераспределение размеров пузырьков;
- уменьшение толщины пленки;
- разрыв пленки.

Эти процессы быстро разрушали бы пены, если бы не стабилизирующие факторы. Этих факторов три: кинетический, структурно-механический и термодинамический.

**Кинетический фактор** замедляет процесс утончения пленок, а следовательно, способствует повышению жизнеспособности пен. Необходимо, правда, отметить, что кинетическое действие заметно проявляется только в малоустойчивых пенах. Кинетический фактор часто называют *эффектом самозалечивания*, или эффектом Марангони. Суть его в том, что утончение пленки вследствие истечения жидкости под действием сил гравитации или



всасывания ее через «каналы Плато – Гиббса» происходит неравномерно. Отдельные участки пленки вокруг пенного пузырька становятся очень тонкими и способны разрушаться. В таких локальных тонких участках поверхностное натяжение возрастает, так как расстояние между молекулами ПАВ в поверхностном слое увеличивается. Вследствие этого раствор с повышенной концентрацией ПАВ из зоны низкого поверхностного натяжения, т. е. из участков с утолщенной пленкой, устремляется к истонченным зонам. Истонченные участки пленки самопроизвольно «залечиваются». Время, за которое совершается такое перетекание раствора, измеряется сотыми и даже тысячными долями секунды, поэтому вероятность разрыва пленки понижается и устойчивость возрастает.

Подтверждением этому служат наблюдения Дюпре: твердые вещества (свинцовая дробь) и капли жидкости (ртуть) могут пройти через пленку пены, не оставив дыры и не вызвав разрыва. Однако после длительной сушки пленки (высыхание пены), когда количество жидкости в ней сильно уменьшилось и перетекание раствора ПАВ становится невозможным, каждый такой «снаряд» вызывает разрыв.

**Структурно-механический фактор** стабилизации пен связан со специфическим упрочнением тонких пленок за счет гидратации адсорбционных слоев, а также за счет повышения вязкости межпленочной жидкости.

Взаимодействие полярных групп молекул ПАВ с водой (гидратация) ограничивает истечение межпленочной жидкости из среднего слоя «сэндвича» пленки под действием сил тяжести и капиллярных сил. В самом адсорбционном слое гидратированные молекулы ПАВ сцепляются между собой, в результате повышается прочность на растяжение и адсорбционных слоев, и пленки в целом.

Для повышения вязкости межпленочной жидкости к ПАВ добавляют определенные продукты, например, в присутствии тысячных долей процента спирта вязкость растворов ПАВ увеличивается в десятки раз.

**Термодинамический фактор**, или расклинивающее давление, проявляется в тонких пленках, когда возникает избыточное давление, препятствующее их утончению под действием внешних сил. Появление расклинивающего давления при истечении из пленок жидкости Б. В. Дерягин и Л. Д. Ландау объяснили следующим образом. На коллоидных частицах поверхностно-активных веществ всегда присутствуют жидкие оболочки повышенной вязкости и упругости. Эти оболочки создают механический барьер, препятствующий сближению и слипанию частиц при утончении пленок за счет истечения жидкости. Кроме того, в водном растворе электролита между поверхностями одноименно заряженных частиц действуют силы отталкивания. Оба эти явления и обуславливают расклинивающее давление в пленке.

Процесс разрушения пены характеризуется *интенсивностью разрушения*  $I_{\text{разр}}$ . Интенсивность разрушения пены за счет действия высокой температуры  $I_{\text{разр}}^{\text{терм}}$  и контактного взаимодействия с горючей жидкостью  $I_{\text{разр}}^{\text{конт}}$  зависит от кратности пены. Чем выше кратность пены, тем ниже интенсивность разрушения от контактного взаимодействия с горючей жидкостью, но увеличивается термическая интенсивность разрушения (рис. 7.3.4).

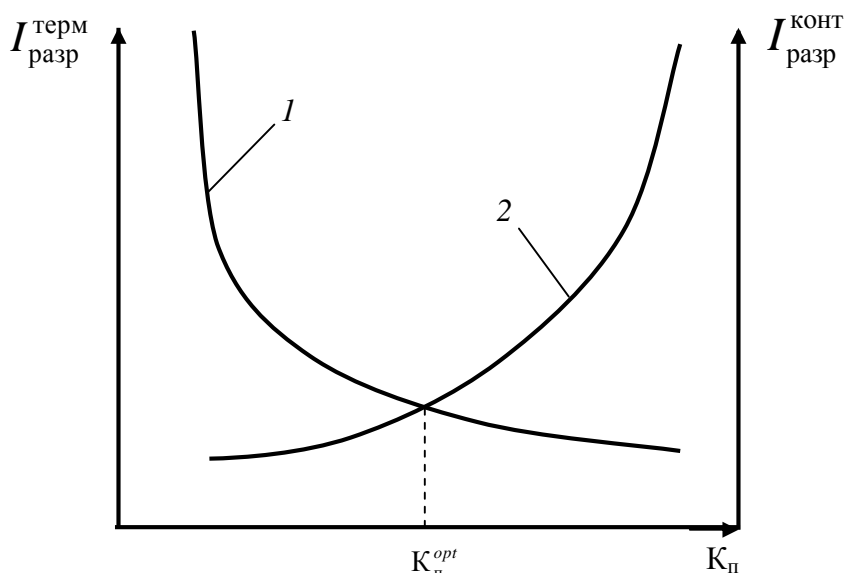


Рис. 7.3.4. Зависимость термической (1) и контактной (2) интенсивностей разрушения пены от кратности

Из рис. 7.3.4 видно, что существует некоторая оптимальная кратность пены, при которой термическая и контактная интенсивности разрушения пены достаточно малы и равны друг другу. Значение такой кратности ориентировочно равно 100.

### 7.3.6. Классификация пенообразователей

Пенообразователи различаются: по назначению, по химической природе поверхностно-активного вещества (ПАВ), по способности образовывать огнетушащую пену на стандартном пожарном оборудовании.

По *назначению* пенообразователи различают: общего назначения, целевого назначения. Пенообразователи общего назначения предназначены для широкого использования при тушении, как правило, неполярных жидкостей и твердых материалов.

По *химической природе ПАВ* пенообразователи подразделяются на:

- протеиновые (обозначение – п);
- синтетические (обозначение – с);

- фторпротеиновые (обозначение – фп);
- фторсинтетические (обозначение – фс).

В маркировке зарубежных пенообразователей химическая природа ПАВ обозначается латинскими буквами соответственно Р, А, РF и АF.

По *способности образовывать огнетушащую пену* на стандартном пожарном оборудовании пенообразователи подразделяются на виды для тушения пожаров пеной:

- низкой кратности;
- средней кратности;
- высокой кратности.

По назначению пенообразователи делятся на классы:

1 – пленкообразующие, для тушения водонерастворимых жидкостей подачей пены низкой кратности на поверхность и в слой нефтепродукта;

2 – для тушения водонерастворимых жидкостей мягкой подачей пены низкой кратности;

3 – целевого назначения, для тушения водонерастворимых жидкостей пеной средней кратности;

4 – общего назначения, для тушения водонерастворимых жидкостей пеной средней кратности, а также твердых горючих материалов пеной низкой кратности и водным раствором смачивателя;

5 – для тушения водонерастворимых горючих жидкостей пеной высокой кратности;

6 – для тушения водонерастворимых и водорастворимых горючих жидкостей.

Принятое деление на классы подразумевает наиболее эффективное применение конкретного пенообразователя. Вместе с тем один и тот же пенообразователь может относиться к разным видам, так как часто из него можно получать пену разной кратности.

Согласно требованиям НПБ 304–2001 для вновь сертифицируемых пенообразователей вся эта информация должна отражаться в условном обозначении, в котором указываются:

- класс (1–6);
- вид (Н, С, В);
- концентрация в рабочем растворе (в %);
- химическая природа пенообразователя (п, с, фп, фс).

Например, маркировка 2 НСВ 6 фс означает, что данный пенообразователь является фторсинтетическим (фс), его концентрация в рабочем растворе 6 %, он предназначен для тушения пеной низкой, средней и высокой кратности (НСВ) водонерастворимых жидкостей (2).

Отсутствие какого-либо индекса в маркировке означает, что пенообразователь не рекомендуется использовать для тушения пожаров пеной данной

кратности. Если производитель рекомендует использовать пенообразователь класса 1, 2, 3, 5 и 6 дополнительно для тушения пожаров твердых горючих материалов, в его условном обозначении указывается индекс А.

Кроме того, в зависимости от возможности использования воды с различным содержанием неорганических солей пенообразователи подразделяются на следующие типы. Пенообразователи для получения огнетушащей пены с использованием воды:

- питьевой;
- жесткой пресной;
- морской.

После тушения пожара пенообразователи попадают в почву, водоемы и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. В зависимости от способности разлагаться под действием микрофлоры водоемов и почв пенообразователи согласно ГОСТ Р 50595 подразделяются на:

- быстроразлагаемые;
- умеренноразлагаемые;
- медленноразлагаемые;
- чрезвычайно медленноразлагаемые.

Чем медленнее разлагается пенообразователь, тем больше экологический ущерб от тушения пожара. При наличии выбора предпочтительнее использовать быстроразлагаемые вещества. Вместе с тем слишком быстрое биологическое разложение является отрицательным фактором при хранении пенообразователя. Поэтому в состав некоторых протеиновых пенообразователей входят добавки, ингибирующие этот процесс.

Протеиновые и синтетические пенообразователи составляют группу пенообразователей общего назначения. *Протеиновые пенообразователи* состоят из гидролизованного белка с добавками стабилизаторов. Они образуют пену низкой и средней кратности и предназначены для тушения углеводородов. Пены на основе протеиновых пенообразователей обладают высокой стойкостью к действию теплового излучения пламени. Они не боятся контакта с нагретыми стенками резервуара. К их недостаткам относится способность смешиваться и загрязняться углеводородами в ходе тушения, что требует очень мягкой (плавной) подачи пены на горящую поверхность нефти. В силу этого они быстро обезвоживаются на поверхности уже потушенной нефти и теряют изолирующую способность, что создает угрозу повторного воспламенения.

*Синтетические пенообразователи* предназначены для получения пены низкой, средней и высокой кратности. У пен на их основе меньше интенсивность контактного разрушения, чем у пен на основе протеиновых пенообразователей. На поверхности уже потушенной нефти получаемая из них пена медленнее обезвоживается и дольше сохраняет изолирующую способность. Однако она недостаточно устойчива при контакте с нагретыми

углеводородами и твердыми предметами в процессе тушения. Поэтому за рубежом их не рекомендуют для тушения пожаров в крупных резервуарах и при больших проливах. Пену средней и высокой кратности рекомендуются применять для тушения пожаров в ангарах, корабельных отсеках, машинных залах, галереях и т. д.

*Фторпротеиновые и фторсинтетические пенообразователи* согласно отечественной классификации являются целевыми. Они представляют собой смеси соответствующих углеводородных пенообразователей и фторсодержащих поверхностно-активных веществ. Добавка фторсодержащего ПАВ привела к повышению устойчивости пен к загрязнению углеводородами как во время тушения, так и после создания изолирующего слоя на поверхности жидкости. При этом существенно возросла гидростатическая стойкость пен низкой кратности. Это позволило подавать пену на резервуар с больших расстояний из-за обвалования навесными струями.

Ряд фторированных пенообразователей (как фторпротеиновых, так и фторсинтетических) обладает способностью образовывать пленку водного раствора на поверхности жидкости. За счет этого пена быстро растекается по поверхности и отличается повышенной изолирующей способностью. Кроме того, рабочие растворы пленкообразующих пенообразователей значительно меньше взаимодействуют с углеводородами нефти, что обеспечивает высокую контактную стойкость как пены, так и пленки. Степень загрязнения пены из пленкообразующего пенообразователя возрастает с увеличением кратности. Поэтому для тушения используют пены низкой кратности или пеноэмульсии.

Все фторсодержащие пленкообразующие пенообразователи пригодны для подслоного способа тушения нефти. Однако в ходе сравнительных натурных испытаний было установлено, что фторпротеиновые пены более эффективны, чем фторсинтетические. Фторпротеиновые пленкообразующие пенообразователи типа FFFP предназначены для получения низкократной пены, сочетающей в себе повышенную огнетушащую эффективность, присущую пене из пленкообразующих составов, и надежность, характерную для пены из фторпротеиновых пенообразователей. Такая пена имеет хорошую текучесть, повышенную устойчивость к загрязнению нефтепродуктами, а также сопротивляемость к повторному воспламенению топлива, образует устойчивую изолирующую пленку на поверхности углеводородов, в том числе и при наличии горячих поверхностей, прочно прилипает к металлическим конструкциям. Кроме того, достоинствами пенообразователей являются длительный гарантийный срок хранения, низкая температура замерзания, возможность получения пены с водой любой жесткости, а также совместимость пены с огнетушащими порошками при их отдельной подаче.

### 7.3.7. Параметры тушения пенами

Процесс тушения характеризуется следующими параметрами.

*Время тушения*  $\tau_T$ , с, – время от момента подачи пены на поверхность жидкости до момента прекращения горения.

*Интенсивность подачи*  $I_{\Pi}$ , л/(м<sup>2</sup>·с), – количество раствора пенообразователя, подаваемое на 1 м<sup>2</sup> площади пожара в секунду:

$$I_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{S_{\Pi} \tau_T}, \quad (7.3.1)$$

где  $V_{\Pi}$  – объем пены;

$S_{\Pi}$  – площадь пожара;

$\tau_T$  – время тушения.

*Удельный расход*  $q_{уд}$ , л/м<sup>2</sup>, – объем раствора пенообразователя, израсходованный на тушение 1 м<sup>2</sup> площади пожара:

$$q_{уд} = I_{\Pi} \tau_T. \quad (7.3.2)$$

Время тушения зависит от соотношения интенсивностей подачи и разрушения пены. Если интенсивность подачи равна интенсивности разрушения, то такую интенсивность подачи называют *критической*  $I_{кр}$ , при этом тушение не достигается, т. е. время тушения стремится к бесконечности ( $\tau_T \rightarrow \infty$ ). Характерная зависимость времени тушения (кривая тушения) и удельного расхода от интенсивности подачи показана на рис. 7.3.5.

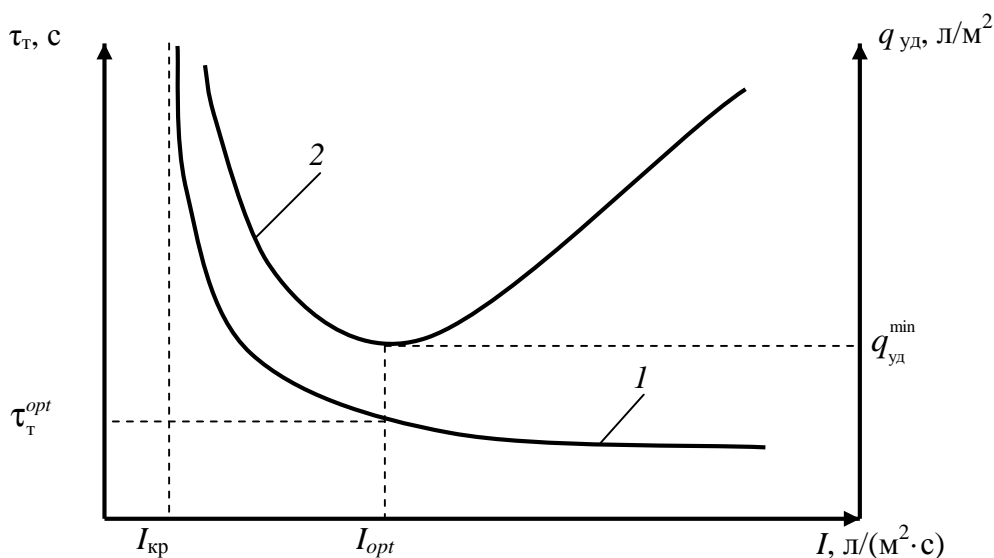


Рис. 7.3.5. Зависимость времени тушения  $\tau_T$  (1) и удельного расхода  $q_{уд}$  (2) от интенсивности подачи раствора пенообразователя ( $I_{\Pi}$ )

Эффективность тушения пеной определяется интенсивностью ее подачи  $I_{\Pi}$ . Рассмотрим процесс накопления пены на поверхности горючей жидкости. На какой-то момент времени тушения  $\tau_T$  происходит накопление пены определенного объема  $V_{\Pi}$  на поверхности горючего материала.

Если предположить, что объем пены, разрушающийся в единицу времени, пропорционален объему поданной пены, т. е. равен  $V_{\text{пены}}S^{-1}$  (где  $S$  – стойкость пены), то увеличение объема пены на поверхности горячей жидкости за время  $d\tau$  будет равно:

$$dV_{\text{пены}} = \left( g_{\text{пены}} - \frac{V_{\text{пены}}}{S} \right) d\tau, \quad (7.3.3)$$

где  $g_{\text{пены}}$  – расход пены,  $\text{м}^3/\text{с}$ , обеспечиваемый данным пеногенератором.

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получаем:

$$V_{\text{пены}} = g_{\text{пены}} S \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{S}} \right). \quad (7.3.4a)$$

Эта формула показывает, какой объем пены будет накоплен на поверхности горячей жидкости в данный момент времени, отсчитываемый от начала тушения, если пену подавать с секундным расходом  $g_{\text{пены}}$ .

Для тушения пламени на заданной площади  $S_{\text{п}}$  необходимо накопить на ней определенный объем пены  $V_{\text{пены}}$ . Этот объем будет получен по истечению времени тушения  $\tau_{\text{т}}$ . Поэтому, исходя из уравнения (7.3.4a), можно написать:

$$V_{\text{пены}} = g_{\text{пены}} S \left( 1 - e^{-\frac{\tau_{\text{т}}}{S}} \right). \quad (7.3.4б)$$

Разделив правую и левую части последнего равенства на площадь пожара  $S_{\text{п}}$ , получим:

$$h_{\text{т}} = I_{\text{п}} S \left( 1 - e^{-\frac{\tau_{\text{т}}}{S}} \right), \quad (7.3.5)$$

где  $I_{\text{п}}$  – интенсивность подачи пены,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$  или  $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$h_{\text{т}}$  – средняя толщина слоя пены, м, накопленного на площади  $S_{\text{п}}$  к концу тушения.

Решая уравнение (7.3.5) относительно времени тушения, получаем:

$$\tau_{\text{т}} = S \ln \frac{1}{1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{п}}}}, \quad (7.3.6)$$

где  $I_{\text{кр}}$  обозначено отношение  $h_{\text{т}} / S$ . Очевидно, что величина  $I_{\text{кр}}$  представляет критическую интенсивность подачи пены, ниже которой тушение пламени невозможно. Итак, интенсивность подачи, равная интенсивности разрушения, называется *критической интенсивностью подачи*.

В связи с тем, что время тушения в значительной степени зависит от интенсивности подачи пены, встает вопрос о выборе оптимальной интенсивности, которая должна быть связана с критической интенсивностью. Интенсивность подачи, при которой удельный расход пенообразователя минимален, называется *оптимальной*  $I_{\text{опт}}$ .

Тогда в качестве критерия для определения подачи оптимальной интенсивности необходимо взять минимальный объем пены, который затрачивается для тушения пламени на площади  $1 \text{ м}^2$ . Удельный расход пены равен интенсивности подачи пены, умноженной на время тушения, т. е.

$$q_{\text{уд}} = I_{\text{п}} S \ln \frac{1}{1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{п}}}}. \quad (7.3.7)$$

Величина удельного расхода имеет размерность  $\text{м}^3/\text{м}^2$  или  $\text{л}/\text{м}^2$ . Зависимость величины удельного расхода от интенсивности подачи пены показана на рис. 7.3.5. Характер этой зависимости таков, что удельный расход пены и общий расход пенообразующих средств при тушении пламени на заданной площади уменьшается с увеличением интенсивности подачи пены. Причем резкое уменьшение происходит вблизи критической интенсивности. Очевидно, что оптимальная интенсивность должна быть выбрана так, чтобы дальнейшее увеличение интенсивности не приводило к существенному увеличению удельного расхода. Расчет показывает, что в качестве оптимального может быть выбрано такое значение интенсивности подачи, при котором отношение  $\tau_{\text{т}} / S$ , деленное на  $1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{п}}}$ , равно единице, т. е.

$$\ln \frac{1}{1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{п}}}} = 1 - \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{п}}}. \quad (7.3.8)$$

Решая это уравнение, получаем связь между оптимальной и критической интенсивностями подачи пены:

$$I_{\text{opt}} = (2 - 3)I_{\text{кр}}. \quad (7.3.9)$$

Обычно  $I_{\text{opt}} = (2 - 3)I_{\text{кр}}$  и зависит от состава пенообразователя, вида горючей жидкости, параметров пены и др.

Эффективность применяемого пенообразователя, способа подачи пены можно оценить с помощью показателя эффективности тушения (удельная скорость тушения)  $\Pi_{\text{э,т}}$ ,  $\text{м}^2/(\text{л} \cdot \text{с})$ . Он равен:

$$\Pi_{\text{э,т}} = \frac{1}{I_{\text{п}} \tau_{\text{т}}^2}. \quad (7.3.10)$$

### 7.3.8. Способы тушения пенами жидкостей в резервуарах

В настоящее время резервуары со стационарной крышей без понтона оборудуются стационарными устройствами пожаротушения главным образом двух видов: для подачи пены сверху – пенокамеры и пеносливывы



и подачи пены снизу через слой жидкости – напорные пеногенераторы с разводкой трубопроводов в нижней части резервуара. Реже применяется оборудование для транспортирования пены на поверхность через слой жидкости по гибкому рукаву различных модификаций. Скрученный или сложенный гибкий рукав находится вне резервуара в специальном устройстве, сжатый (гофрированный) полимерный рукав размещается в трубопроводе, выдвинутом внутрь резервуара. Под давлением пены гибкий рукав расправляется и доставляет ее к поверхности жидкости. Последний способ еще называют *полуподслоиным*.

При подаче пены сверху эффективность тушения существенно зависит от продолжительности свободного горения. Чем дольше горит нефть, тем выше температура и больше толщина гомотермического слоя, тем более интенсивно разрушается пена при контакте с жидкостью. Соответственно возрастает риск того, что критическая интенсивность подачи превысит нормативную и вместо прекращения горения подача пены спровоцирует вскипание и выброс. Кроме того, при частичном отрыве крыши резервуара и факельном горении паров горючего в образовавшихся зазорах интенсивно разрушаемая пена играет роль транспортера окислителя в переобогащенную смесь. При длительной подаче это может привести к образованию в надтопливном пространстве горючей паровоздушной смеси и разрушению резервуара в результате ее воспламенения (взрыва).

Общим недостатком стационарных пенокамер является то, что они располагаются в верхнем поясе резервуара и при возникновении горения практически всегда сразу выходят из строя. Кроме того, из-за контакта с сероводородом их элементы, даже изготовленные из нержавеющей стали, подвержены коррозии, что снова приведет к потере герметичности. Данные устройства следует рассматривать как средство защиты негорящих резервуаров, а не как средство тушения.

Непосредственная подача пены через слой жидкости имеет ряд преимуществ перед другими способами тушения (как стационарными устройствами, так и передвижной техникой). Нижние слои нефти в резервуаре имеют существенно более низкую температуру, чем гомотермический слой. Пенная струя, попадая в горючее, разбивается на некие локальные объемы, самостоятельно всплывающие на поверхность. Это приводит к интенсивному перемешиванию всех слоев горючего, охлаждению и разрушению гомотермического слоя. Существенным является и то, что при частичном контактном разрушении пены в жидкости остается раствор пенообразователя, который по сравнению с горючим имеет более низкую температуру, что также способствует понижению температуры нефти в резервуаре и уменьшению интенсивности разрушения пены на поверхности.

Эти вспомогательные факторы отсутствуют при подаче пены снизу через гибкий рукав. Вместе с тем через рукав можно подавать пену из обычного углеводородного пенообразователя общего назначения. При таком способе тушения существенно уменьшается интенсивность одного из слагаемых процесса разрушения любых пен – термического разрушения тепловыми потоками от пламени.

Существенным положительным фактором использования способов подачи снизу является также то, что применяемое оборудование размещается за пределами обвалования и при аварийном проливе или разрушении резервуара сохраняет работоспособность. Кроме того, оно не подвергается коррозии.

При подслоном тушении пену можно закачивать в резервуар через технологические трубопроводы или пенопроводы системы пожаротушения стационарно врезанные в нижнюю часть резервуара с помощью как стационарных напорных пеногенераторов, так и передвижной пожарной техники. Полномасштабные огневые полигонные испытания на резервуаре РВС-5000 показали, что тушение нефти одинаково эффективно при закачивании пены:

- по трубопроводам системы подслоного пожаротушения;
- линии гидроразмыва донных отложений;
- линии подачи нефти.

Тем не менее наиболее целесообразным признано оборудование резервуаров стационарными системами подслоной подачи пены.

Тушение пожаров на складах нефти и нефтепродуктов имеет свои особенности:

1. При подаче пены через борт резервуара личный состав и техника находятся в обваловании, что очень опасно из-за возможности вскипания и выброса горючей жидкости.

2. При пожаре мощные тепловые потоки приводят к быстрой деформации верхних поясов резервуара, выходят из строя пенные камеры стационарной системы пожаротушения, вследствие чего для тушения пожара вынуждены привлекать передвижную пожарную технику.

Автоматическая установка пожаротушения пеной средней кратности не обеспечивает тушение по следующим причинам: в 50 % случаев узлы ввода пены повреждаются взрывом, в 25 % – огнем в обваловании и в 25 % – другие причины.

3. При обрушении кровли возникают закрытые зоны – «карманы», в которые практически не поступает пена. Накоплению пены препятствуют ветер, конвективные потоки, разрушение пены при прохождении через высокотемпературную зону и при контакте с горючей жидкостью (ГЖ).

Более надежным и безопасным при использовании передвижной техники является подслоный способ тушения.

Подслойный способ тушения пожаров в резервуарах в нашей стране сдерживался, так как не были достаточно изучены вопросы транспортировки пены в слое горючего, растекание ее по поверхности ГЖ, степень «загрязнения» пены горючим и т. п. Пенообразователи, изготовленные из углеводородных поверхностно-активных веществ (ПАВ) типа ПО-1 и ПО-6К (пенообразователи общего назначения), не могут быть использованы при данном способе пожаротушения, так как при погружении в ГЖ пены адсорбируют нефтепродукт своей развитой поверхностью, полностью выгорают и разрушаются под действием факела пламени, т. е. утрачивают свою изолирующую способность.

Разработанные фторсодержащие ПАВ (ФПАВ) послужили основой для создания принципиально новых пленкообразующих пенообразователей для тушения нефтепродуктов. Они сочетают в себе традиционные качества: изолирующую и охлаждающую способность, хорошую растекаемость, простоту применения с принципиально новым свойством – способностью образовывать тонкую пленку на поверхности углеводородных жидкостей и не адсорбировать ГЖ на поверхности пены при ее прохождении через слой горючего.

Подача пены в слой горючего возможна только при использовании специальных пенообразователей, обладающих инертностью к нефтепродуктам. В настоящее время это фторпротеиновые и фторсинтетические пенообразователи. Получаемая на их основе пена низкой кратности подается непосредственно в слой нефтепродукта через технологические трубопроводы или пенопроводы системы пожаротушения, находящиеся в нижней части резервуара (рис. 7.3.6), с помощью передвижной пожарной техники или специальных установок.

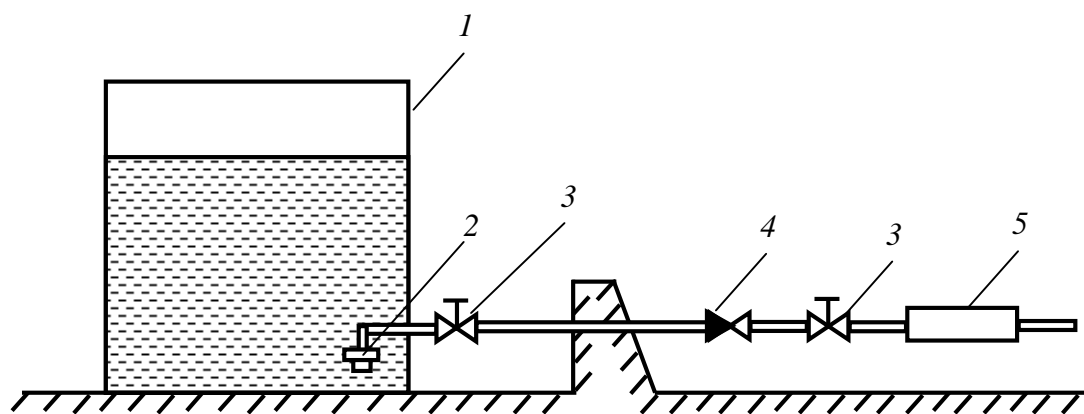


Рис. 7.3.6. Схема врезки независимого пенопровода для подачи пены под слой продукта:

- 1 – резервуар; 2 – диффузор; 3 – задвижки; 4 – обратный клапан (хлопуша);  
5 – пеногенератор для получения пены низкой кратности

При пожаре в резервуаре практически исключается повреждение коммуникаций и вводов систем подслоного тушения (СПТ) от взрывов и тепловых потоков.

Пена низкой кратности образуется в стволах эжекционного типа, находящихся, как правило, за обвалованием, выталкивает из трубопроводов горючую жидкость и поступает в резервуар. Выходя из пенопровода и интенсивно перемешиваясь со слоями горючего, пенные потоки разбиваются на отдельные капли. Степень загрязнения пенного потока значительно уменьшается при снижении его скорости до 0,6–1 м/с, для чего используются специальные насадки или диффузоры.

Время прохождения пены от стволов до поверхности резервуара, как правило, составляет 40–60 с. Всплывая через слой горючего, она способна преодолевать затонувшие конструкции и растекаться по всей поверхности. Кроме того, в результате конвективного теплообмена циркулирует прогретый слой и снижается температура на поверхности.

Значительное снижение интенсивности горения достигается через 90–120 секунд с момента появления пены на поверхности. В это время наблюдаются отдельные очаги горения у разогретых металлических конструкций резервуара. Через 120–180 с горение полностью прекращается.

После прекращения подачи пены на всей поверхности горючей жидкости образуется устойчивый пенный слой толщиной до 5 см, в течение 2–3 ч защищающий ее от повторного воспламенения.

### **7.3.9. Методы испытания пен и пенообразователей**

Серийно выпускается большое количество различных пенообразователей. Поэтому возникает вопрос об эффективности разных видов пенообразователей. Существуют экспериментальные методы ее определения. Например, по германским стандартам DIM, которые применяются и в России, огнетушащая эффективность пен на основе синтетических пенообразователей проверяется в полигонных условиях в два этапа.

На *первом этапе* в цилиндрический металлический противень с толщиной стенки 2 мм, площадью зеркала жидкости 4 м<sup>2</sup> на водяную подушку заливают 100 л бензина. Время свободного горения ограничивается в пределах 60 с. Секундный расход рабочего водяного раствора из пенного ствола при тушении пожара низкократной пеной составляет 0,38 л/с, пеной средней кратности – 0,15 л/с. Время основного тушения пеной низкой кратности не должно превышать 90 с, а время полного тушения – 150 с. Потушенный нефтепродукт не должен воспламениться от горящего факела в течение 5 мин. При тушении пеной средней кратности время тушения не должно превышать 60 с.

На *втором этапе* в цилиндрический резервуар с площадью зеркала жидкости  $40 \text{ м}^2$  на водяную подушку заливают 1000 л реактивного авиационного топлива. Время свободного горения 60 с. Время основного тушения загоревшегося продукта низкократной пеной не должно превышать 150 с, а время полного тушения – 210 с. Через 5 мин после прекращения подачи пены в ее слой на удалении 500 мм от борта резервуара вводят рамку с внешними размерами  $400 \times 400$  мм. Пену из рамки удаляют. Топливо в рамке зажигают, а саму рамку удаляют из резервуара. В течение последующих 5 мин горение не должно распространяться по всей поверхности резервуара. Время полного тушения пеной средней кратности на втором этапе не должно превышать 75 с.

Методы определения огнетушащей эффективности пен, получаемых из протеиновых и фторпротеиновых пенообразователей, аналогичны вышеописанным, только используют разные значения времени тушения.

### Контрольные вопросы

1. Что собой представляет пена? Какова ее структура?
2. Назовите основные причины (виды) разрушения пены.
3. Как классифицируются основные пенообразователи?
4. Назовите основные параметры пены.
5. Какую роль играет разрушение пены в процессе тушения горючих жидкостей?
6. В чем заключается механизм прекращения горения жидкости пенами?
7. Чем различаются процессы, протекающие при тушении жидкостей пенами, полученными из пенообразователей разных видов?
8. Назовите основные параметры тушения пенами.
9. Что такое критическая и оптимальная интенсивности подачи? Чем определяются их значения для пенообразователей разных видов?
10. Какие существуют способы тушения пенами пожаров резервуаров?

## 7.4. Порошковые огнетушащие составы

### 7.4.1. Классификация огнетушащих порошков

Огнетушащие порошки (порошковые составы) – высокоэффективные и практически универсальные огнетушащие вещества. Применение порошков не исключает использование других огнетушащих веществ, более того, эффективным в ряде случаев оказывается комбинированное тушение.

Основные преимущества порошков следующие:

- они практически не повреждают имущество;
- способны тушить материалы, которые водой не тушатся или тушатся с трудом (резина, пластики);
- тушат электроустановки под напряжением (до 1000 В);
- их легко доставить к очагу пожара (например, в огнетушителях);
- способны быстро снижать среднеобъемную температуру в помещении.

Огнетушащие порошки классифицируют по очагам пожаров, для тушения которых тот или иной порошок предназначен. Современная классификация очагов пожаров приведена ниже.

Очаги класса А – горение твердых веществ:

A1 – горение твердых веществ, сопровождаемое тлением (уголь, текстиль, древесина, целлюлозосодержащие материалы);

A2 – горение твердых веществ, не сопровождаемое тлением (плавящиеся полимерные материалы и органические соединения).

Очаги класса В – горение жидких веществ:

B1 – горение жидких веществ нерастворимых в воде (бензин, эфир, нефтепродукты), горение сублимирующихся твердых веществ (парафин, стеарин);

B2 – горение жидких веществ растворимых в воде (спирт, глицерин).

Очаги класса С – горение газообразных веществ (бытовой газ, пропан и др.).

Очаги класса D – горение металлов:

D1 – горение легких металлов, за исключением щелочных (алюминий, магний и их сплавы);

D2 – горение щелочных металлов (натрий, калий);

D3 – горение металлосодержащих и металлоорганических соединений, гидридов металлов.

Очаги класса E – электроустановки, находящиеся под напряжением. Однако по механизму прекращения горения эти очаги фактически

могут относиться к классу А (горение изоляции кабелей и проводов), В (горение разлива масла) или являться комбинированными.

Порошковые огнетушащие составы делятся на огнетушащие порошки общего назначения и огнетушащие порошки специального назначения. К порошкам общего назначения относят составы классов АВС (АВСЕ) и ВС (ВСЕ). Порошки, предназначенные для тушения металлов, считаются специальными. Данная классификация построена по признаку наиболее эффективного применения и не означает полного отсутствия огнетушащего действия в случае использования порошка для тушения очага несоответствующего класса. Так, порошок марки ПСБ-3М, относящийся к классу ВС, эффективно тушит отдельную резиновую крышку (очаг класса А2) и небольшой штабель древесины (очаг класса А1) на открытом пространстве, но не способен потушить те же материалы при развившемся пожаре в помещении.

#### 7.4.2. Состав и основные области применения огнетушащих порошков

Огнетушащие порошки представляют собой многокомпонентные дисперсные системы, различающиеся по составу и свойствам. Однако все они имеют практически одинаковый по назначению набор компонентов (рис. 7.4.1):

- огнетушащая основа – 90...95 %;
- гидрофобизатор – 3...5 %;
- наполнители, к ним относят:
  - антидепрессанты – 1...3 %;
  - антиоксиданты – 0,5...2 %;
  - целевые добавки – 1...3 %.

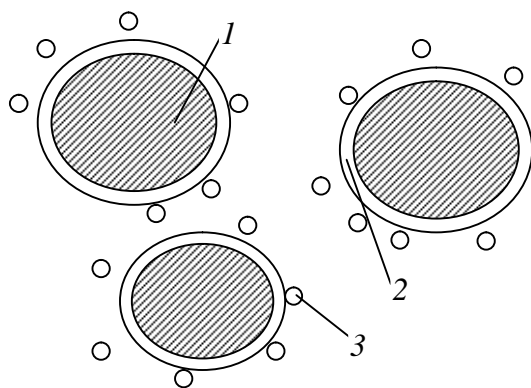


Рис. 7.4.1. Структура порошков:  
1 – основа; 2 – гидрофобизатор;  
3 – наполнитель

**Основа** (табл. 7.4.1) составляет 90–95 % массы порошка, от нее в первую очередь зависит область применения, а также набор остальных компонентов.

Таблица 7.4.1

**Наиболее распространенные основы огнетушащих порошков**

Класс порошков	Основа		Примечание
ВСЕ	$\text{NaHCO}_3$ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ $\text{KHCO}_3$ $\text{K}_2\text{CO}_3$	Бикарбонат (гидрокарбонат) натрия Карбонат натрия Гидрокарбонат калия Карбонат калия	Гигроскопичны
АВСЕ	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Диаммонийфосфат Моноаммоний фосфат (аммофос) Диаммоний сульфат	Плавятся на нагретых поверхностях
D	$\text{KCl}$ $\text{NaCl}$ С	Хлорид калия Хлорид натрия Графит	–

Как видно из табл. 7.4.1, основой большинства порошков класса ВС являются натриевые и калиевые соли угольной кислоты – карбонаты. При этом огнетушащие составы на основе солей калия несколько более эффективны, чем составы на основе солей натрия. Однако данные вещества более гигроскопичны, соответственно порошки на их основе более склонны к слеживанию, что уменьшает сроки их хранения. Для уменьшения слеживаемости таких порошков приходится использовать более дорогостоящие гидрофобизаторы, что существенно увеличивает их цену. В целом огнетушащая способность порошковых составов уменьшается в ряду:



Наиболее широко для получения порошков класса ВСЕ используется *бикарбонат натрия* ( $\text{NaHCO}_3$ ) в связи с тем, что является самым дешевым веществом из всех перечисленных. Порошки на его основе применяются повсеместно для тушения розливов жидкостей, электроустановок под напряжением до 1000 В, реже – для тушения очагов класса А2. Также эффективны они при тушении животных жиров и растительных масел, поэтому такие порошки (и даже чистая питьевая сода) применяется при тушении пожаров и загораний на объектах приготовления пищи, в вытяжных колпаках и вентиляционных каналах, где образуются жировые отложения.

Порошки класса ВС эффективно прекращают пламенное горение. Однако для тушения жидкостей в ряде случаев этого может быть недостаточно: необходимо обеспечить хотя бы кратковременное изолирующее действие,



т. е. прекратить совсем или уменьшить поступление паров горючего в зону горения (см. гл. 6). Наиболее эффективным в таких случаях должно быть одновременное применение порошка класса ВС и пены. Однако бикарбонат и карбонат натрия очень интенсивно пену разрушают. Огнетушащий порошок на основе *бикарбоната калия* марки Purple-K первоначально был разработан для использования в системах комбинированного тушения с одновременной подачей «легкой воды» (пены на основе пенообразователя класса AFFF), но в настоящее время он, как правило, используется самостоятельно. Было установлено, что он очень эффективен при тушении пожаров моторного топлива. Этот порошок стоит дороже порошков на основе бикарбоната натрия.

К порошкам класса ВС относится порошок марки Monnex. В его основе сплав мочевины и бикарбоната калия. В зоне горения под действием высокой температуры твердые частицы этого сплава растрескиваются, что резко увеличивает их удельную поверхность. Кроме того, вновь образованная поверхность обладает повышенной реакционной способностью, что помогает нейтрализовать активные центры реакции горения. Этот порошок, разработанный в Англии, согласно данным Национальной ассоциации противопожарной защиты США, является наиболее эффективным из всех испытанных огнетушащих порошков. Однако он не нашел широкого применения ввиду высокой стоимости.

Основой большинства порошков класса ABC являются *фосфаты аммония* (см. табл. 7.4.1). Порошки этого класса являются универсальными, поскольку могут успешно применяться для тушения веществ, находящихся в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Однако определяющим здесь является способность воздействовать на поверхность твердого вещества. При нагреве до температуры порядка 120 °С фосфаты аммония начинают плавиться с поглощением тепла. Попадая на поверхность, нагретую выше данной температуры, частицы огнетушащего вещества отбирают от нее тепло на осуществление фазового превращения. Кроме того, на поверхности они образуют вязкую полимерную пленку плава, оказывающую изолирующее действие.

Огнетушащие порошки специального назначения были разработаны для тушения металлов: магния, калия, натрия и их сплавов, титана, циркония, порошкообразного алюминия и некоторых других, т. е. очагов класса D. Это единственные огнетушащие вещества, которые позволяют локализовать и тушить пожары металлов, не вызывая при этом бурной химической реакции.

Существует несколько типов огнетушащих порошков специального назначения. В основе первого лежит графит, способствующий активному отводу тепла от зоны горения.

Второй – на основе хлорида калия. Он совместим с пеной на основе протеинового пенообразователя. Его огнетушащая способность примерно такая же, как у порошка на основе бикарбоната калия.

Основой порошка третьего типа служит хлорид натрия. Он подается из переносных огнетушителей с помощью углекислого газа, а из передвижных или стационарных систем – с помощью азота. Так же как и порошки на основе графита, он очень эффективен при тушении очагов класса *D*.

Основным принципом достижения положительного результата при тушении металлов и металлоорганических соединений является создание с помощью огнетушащего порошка защитного покрытия на поверхности горения, препятствующего доступу к ней кислорода. Такое покрытие должно быть достаточно плотным, иметь необходимую толщину слоя порошка по всей поверхности очага горения, что достигается при определенном удельном расходе порошка ( $\text{кг/м}^2$ ).

В качестве **гидрофобизаторов** обычно используются некоторые минеральные соединения и стеараты металлов. Это аэросил ( $\text{SiO}_2$ ) чистый или с добавками дихлордиметилсилана  $(\text{CH}_3)_2\text{Cl}_2\text{Si}$ ; стеараты кальция, магния, алюминия, например  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Ca}$  – стеарат кальция;  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_2\text{Mg}$  – стеарат магния;  $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})_3\text{Al}$  – стеарат алюминия; триалкилфосфаты  $\text{R}_3\text{PO}_4$ , где R – углеводородный радикал (например, трибутилфосфат  $(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}_4$ ).

**Наполнителями** обычно служат добавки, улучшающие текучесть порошков и предотвращающие их комкование и слеживаемость. В этом качестве используют, например, нефелиновый концентрат  $(\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2)$ , тальк  $(3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O})$ , слюду  $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ , порошкообразный графит (углерод).

### 7.4.3. Показатели качества огнетушащих порошков и методы их определения

Приводимые ниже методы исследования порошковых огнетушащих составов служат только для оценки пригодности конкретного материала к эксплуатации. Получаемые при этом данные не позволяют сравнивать эффективность различных составов, способов подачи. Объективными данными при решении таких задач являются значения критической интенсивности подачи, минимальный удельный расход (гл. 6).

Следует также иметь в виду, что результаты испытаний сильно зависят от конструкции испытательного устройства. Поэтому сравнивать характеристики различных порошков или различных партий можно только по данным, полученным на одном приборе.

Показатели качества порошков приведены в ГОСТ 4.107–83\* «Система показателей качества продукции. Порошки огнетушащие. Номенклатура показателей». Он устанавливает номенклатуру основных показателей качества огнетушащих порошков, включаемых в разрабатываемые и пересматриваемые стандарты на продукцию, ТЗ на опытно-технологические работы, технические условия, карты технического уровня и качества продукции.

*Показатель огнетушащей способности  $E$ , кг/м<sup>2</sup>*, – масса порошка, необходимая для тушения из огнетушителя единицы площади открытой горячей поверхности или всего очага пожара, принятого в качестве модельного, определяется по формуле

$$E = \frac{m_1 - m_2}{S_{\text{ПГ}}}, \quad (7.4.1)$$

где  $m_1$  – масса заряженного огнетушителя до тушения, кг;

$m_2$  – масса огнетушителя после тушения, кг;

$S_{\text{ПГ}}$  – площадь поверхности горения модельного очага, м<sup>2</sup>.

Фактически показатель  $E$  представляет собой удельный расход порошка на тушение единицы площади поверхности горения модельного очага класса А или В. При использовании результатов определения необходимо учитывать, что они зависят как от технических характеристик огнетушителя, так и от мастерства оператора.

*Текущая  $T$ , кг/с*, – характеризует способность порошка обеспечивать массовый расход через данное сечение в единицу времени под воздействием давления выталкивающего газа. Определяется по результатам испытаний по формуле

$$T = \frac{m_1 - m_2}{\tau}, \quad (7.4.2)$$

где  $m_1$  – масса испытательного прибора с порошком, кг;

$m_2$  – масса испытательного прибора с остатком порошка после выпуска в течение фиксированного времени, кг;

$\tau$  – время выпуска порошка.

В качестве прибора подачи при этом может использоваться огнетушитель закачного типа или специально сконструированное устройство, например, «микровыбрасыватель», корпус которого заполняется порошком известной массы, затем в нем создается избыточное давление воздуха и порошок выбрасывается через перфорированную пластину и трубопровод.

*Кажущаяся плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>*, – отношение массы порошка к занимаемому им объему. Различают кажущуюся плотность порошка неуплотненного  $\rho_n$  и уплотненного под нагрузкой в течение определенного времени  $\rho_y$ :

$$\rho_n = \frac{m}{V_1}; \quad (7.4.3)$$

$$\rho_y = \frac{m}{V_2}, \quad (7.4.4)$$

где  $m$  – масса пробы порошка, кг;

$V_1$  – объем, занимаемый навеской порошка после отстаивания в течение  $(80 \pm 5)$  с, м<sup>3</sup>;

$V_2$  – объем, занимаемый навеской порошка после уплотнения в течение  $(300 \pm 5)$  с, м<sup>3</sup>.

*Показатель слеживаемости*  $\sigma$ , МПа, – характеризует способность огнетушащего порошка слеживаться под воздействием внешних факторов. Для его определения используют три метода: раздавливания цилиндрического образца, метод иглы (пенетрации), измерения напряжения сдвига.

Например, при определении методом раздавливания цилиндра в специальной матрице формируют цилиндрический брикет из увлажненного до 3 % порошка (10–15 г), уплотняют грузом массой 2 кг, высушивают до постоянной массы и определяют усилие его разрушения на гидравлическом прессе, снабженном манометром. Показатель слеживаемости рассчитывают по формуле

$$\sigma = \frac{(n - n_0)KS_0}{S_1}, \quad (7.4.5)$$

где  $n$  – число делений манометра в момент, предшествующий разрушению образца;

$n_0$  – «холостое» число делений манометра;

$K$  – цена деления манометра, МПа;

$S_0$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>;

$S_1$  – площадь торца цилиндрического образца, м<sup>2</sup>.

Считается, что слеживание и связанная с ним потеря или снижение текучести обусловлены образованием контактов сцепления между частицами порошка. Имеются два варианта образования фазовых контактов – путем кристаллизации твердой фазы на поверхности раствора и путем самодиффузии водно-солевых комплексов на поверхности частиц. Оба механизма сильно зависят от влажности порошка, поэтому показатель слеживаемости может быть рассчитан теоретически по формуле

$$\sigma = -2,3\sigma_0 W_0 \lg W_0, \quad (7.4.6)$$

где  $\sigma_0$  – фактор слеживаемости, связанный с коэффициентом гигроскопичности  $\gamma$  зависимостью (для порошков)  $\sigma_0 = 0,05\gamma$ ;

$W_0$  – минимальное значение влажности, при котором начинается поверхностная диффузия водно-солевых комплексов, для многих минеральных удобрений эта величина составляет 0,5–1 %.

Коэффициент гигроскопичности может быть рассчитан по формуле

$$\gamma = \frac{W_1^2}{\tau_1(2W_1 - W_2)} \ln \left( \frac{W_2}{W_1} - 1 \right), \quad (7.4.7)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  – влажность порошка после выдержки его над раствором серной кислоты в течение  $\tau_1$  и  $\tau_2 = 2\tau_1$  часов (обычно  $\tau_1 = 0,5 \div 1,5$  ч);  $\gamma$  измеряется в е. г., 1 е. г. = 1 моль  $H_2O$ /(кг·ч).

Также иногда рассматривают такие показатели, как *устойчивость к термическому воздействию, устойчивость к вибродействиям и тряске, срок сохраняемости* (связанный в первую очередь с показателем слеживаемости) и др.

Одним из наиболее важных параметров порошков является дисперсность. Она обратно пропорциональна среднему диаметру частиц и определяет удельную поверхность – отношение общей поверхности частиц к единице объема дисперсной фазы. Таким образом, чем выше дисперсность, тем меньше размер частиц и, значит, больше удельная поверхность.

Практика показывает, что с уменьшением размеров частиц огнетушащая способность порошков возрастает, однако возможность подачи очень мелких порошков в зону горения затруднена, поэтому промышленные огнетушащие порошки общего назначения содержат фракцию 40–80 мкм, обеспечивающую доставку мелких фракций в зону горения.

При использовании порошков класса ABC необходимо добиться того, чтобы частицы порошка могли пролететь всю зону горения и достичь поверхности. При этом мелкие фракции расходуются на ликвидацию пламени, более крупные оседают на поверхности (охлаждают, изолируют и т. д.).

Современные порошки общего назначения содержат порядка 70 % частиц размером до 50 мкм и в силу этого имеют достаточно высокую скорость витания, т. е. облако порошка быстро оседает под действием силы тяжести. Для того чтобы их протолкнуть в узкие каналы, необходима большая скорость газопорошкового потока. Поэтому для подачи на большие расстояния, например по воздуховодам систем вентиляции угольных шахт, при объемном тушении эндогенных пожаров, применяют более «легкий» порошок марки П-4АП (класс А), в котором не менее 90 % частиц имеют размер 5 мкм.

#### **7.4.4. Механизмы огнетушащего действия порошков**

В процессе тушения порошки проявляют сразу несколько явно выраженных механизмов огнетушащего действия.

Основными из этих механизмов являются: охлаждение зоны горения с одновременным проявлением эффекта огнепреграждения, охлаждение поверхности горючего, а также гомогенное и гетерогенное ингибирование зоны химической реакции. Эти механизмы не только дополняют, но и оказывают взаимное влияние друг на друга. Также порошки проявляют эффект

разбавления зоны горения, а фосфорно-аммонийные составы – еще и эффект изолирования, когда плавятся на нагретых поверхностях и образуют пленку, препятствующую поступлению горючего в зону горения.

1. *Охлаждающий эффект.* Передача тепла от очага к порошковой частице происходит за счет теплопроводности, конвекции и радиации. Каждая частица порошка при этом нагревается от начальной температуры до температуры фазовых переходов, разложения, плавления и испарения основы.

Так, полное теплопоглощение порошка марки П-2АП составляет около 1500 кДж/кг, ПВК-1 – около 1850 кДж/кг, «Пирант-А» – около 1790 кДж/кг. Все эти порошки класса АВС. Для сравнения: теплота испарения жидкого азота – 199,3 кДж/кг, твердой углекислоты – 573,6 кДж/кг; охлаждающий эффект воды при тушении по поверхности – около 2600 кДж/кг.

Полный теоретический охлаждающий эффект порошков может быть выражен формулами:

– для порошков с плавящейся основой (класса АВС):

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{пл}} - T_0) + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{исп}}; \quad (7.4.8)$$

– для порошков с неплавящейся основой (класса ВС):

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{нагр}} - T_0), \quad (7.4.9)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;

$T_{\text{пл}}$  – температура плавления порошка;

$T_0$  – начальная температура;

$Q_{\text{пл}}$  – удельная теплота плавления порошка;

$Q_{\text{исп}}$  – удельная теплота испарения (возгонки);

$T_{\text{нагр}}$  – максимальная температура нагрева порошка в процессе тушения.

Например, для тушения древесины удельный расход  $q_{\text{уд}}$ , кг/м<sup>2</sup>, порошка, обеспечивающий полное охлаждение пиролизованного слоя, можно определить по формуле

$$q_{\text{уд}} = Q_{\text{зап}} / Q_{\text{охл}}, \quad (7.4.10)$$

где  $Q_{\text{зап}}$  – удельный запас тепла, аккумулированный в пиролизованном слое древесины за время свободного горения, кДж/м<sup>2</sup>;

$Q_{\text{охл}}$  – охлаждающий эффект порошка, кДж/кг.

Расчет  $Q_{\text{зап}}$  при горении одиночного образца древесины под действием теплового потока только от собственного пламени приведен в п. 7.2. При горении штабеля из брусков древесины падающий тепловой поток  $q_{\text{вн}}$  изменяется примерно от 24 на внешних поверхностях до 51 кВт/м<sup>2</sup> – на внутренних. Принимая среднее значение  $q_{\text{вн}} = 37,5$  кВт/м<sup>2</sup> и время горения 2–5 мин, по формулам (7.2.51)–(7.2.54) получаем  $Q_{\text{зап}} = 840 \div 2100$  кДж/м<sup>2</sup>.

Для порошка марки «Пирант-А»  $Q_{отв} = 1769$  кДж/кг. Теоретический удельный расход, требуемый для отвода тепла, запасенного в пиролизованном слое древесины, составляет  $0,47-1,19$  кг/м<sup>2</sup> поверхности горения в зависимости от продолжительности горения.

Анализ изменения температуры в различных участках штабеля древесины в момент подачи огнетушащего порошка говорит о том, что наибольшее влияние первоначально оказывается на зону горения, температура в которой падает очень резко (рис. 7.4.2). Однако и внутри штабеля, где присутствует множество переоблучаемых поверхностей, температура за одну минуту уже снижается ниже температуры активного пиролиза, что позволяет реализовать не только необходимое, но и достаточное условие прекращения горения твердых тлеющих материалов – снижение температуры поверхности ниже температуры воспламенения вещества.

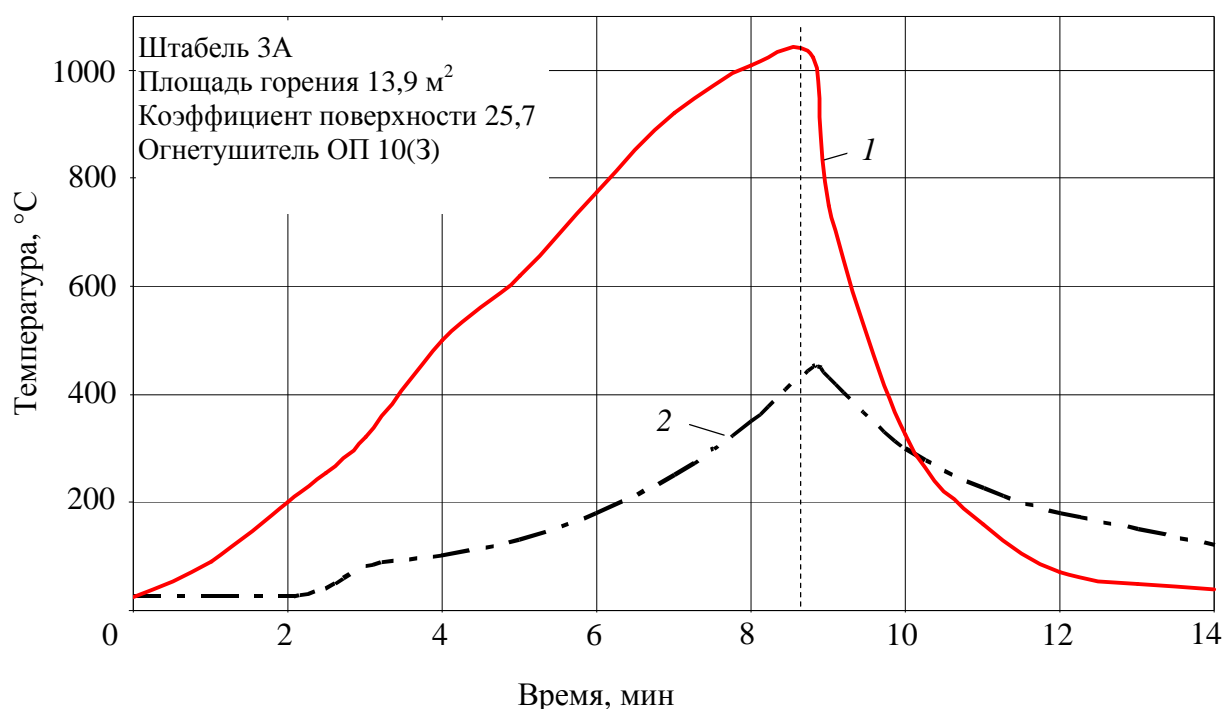


Рис. 7.4.2. Изменение температуры в штабеле древесины при тушении порошком:  
1 – в верхней части штабеля; 2 – в середине штабеля

Фазовые переходы (плавление, испарение, сублимация) протекают сравнительно медленно и далеко не все частицы порошка успевают прогреться и испариться в зоне горения, так как они оказываются экранированы друг другом и находятся там весьма непродолжительное время. Даже частицы диаметром 10 мкм при скорости газового потока в пламени  $0,3$  м/с, успевают потерять за время витания лишь 20 % массы.

Частицы диаметром более 100 мкм практически не прогреваются и не испаряются в пламени реальных пожаров, где скорость газовых потоков превышает 1 м/с. Поэтому порошки данного класса при объемном тушении менее эффективны, чем порошки класса ВС.

В целом можно констатировать, что степень прогрева и испарения частиц порошка в пламени зависит в основном от диаметра частицы и скорости газового потока, формирующего пламя, а в случае ее разложения – еще и от индивидуальной для данного вещества скорости разложения. Для тонкодисперсных порошков с диаметром частиц 1–10 мкм возможно испарение значительной доли порошкового облака в очаге, однако и в этом случае увеличивается скорее влияние гомогенного ингибирования, а не теплоотвода.

2. *Эффект огнепреграждения.* Его также можно назвать эффектом «объемной сетки».

Если рассматривать порошковое облако как своеобразную сетку, «наброшенную» на пламя, то оно должно погаснуть при расстоянии между частицами порошка

$$d_{\text{кр}} = \frac{Re_{\text{кр}} \nu}{c_{\text{г}} \lambda_{\text{г}} \rho_{\text{г}}}, \quad (7.4.11)$$

где  $Re_{\text{кр}}$  – критическое значение числа Пекле ( $Re_{\text{кр}} = 30 \div 100$ );

$\nu$  – скорость пламени;

$c_{\text{г}}, \lambda_{\text{г}}, \rho_{\text{г}}$  – теплоемкость, теплопроводность и плотность газа.

Обращает на себя внимание то, что в этой формуле есть только параметры газа, а параметров материала сетки (в нашем случае – частиц порошка) – нет. Это говорит о важности функции именно энергоотвода «стенкой» химической энергии активных центров реакции при малозначительном нагреве самой стенки и объясняется тем, что действие охлаждения сказывается уже на расстоянии  $10^{-2}$  м от стенки, а действие рекомбинации – лишь на  $10^{-3}$  м.

Таким образом, эффект огнепреграждения состоит из энергоотвода химической энергии из реакционной зоны и практически мгновенной одновременной по всему объему «тепловой» гибели активных центров реакции. При этом свойства материалов порошка особой роли не играют.

Однако если поверхность частиц порошка еще и химически активна, то к тепловой гетерогенной гибели активных центров добавляется и их химическая дезактивация.

3. *Гетерогенное ингибирование.* В общем случае возможны несколько принципиальных вариантов взаимодействия активных центров реакции горения ( $Y_1$ ) с кристаллической поверхностью ингибитора (П). Они приведены на рис. 7.4.3.



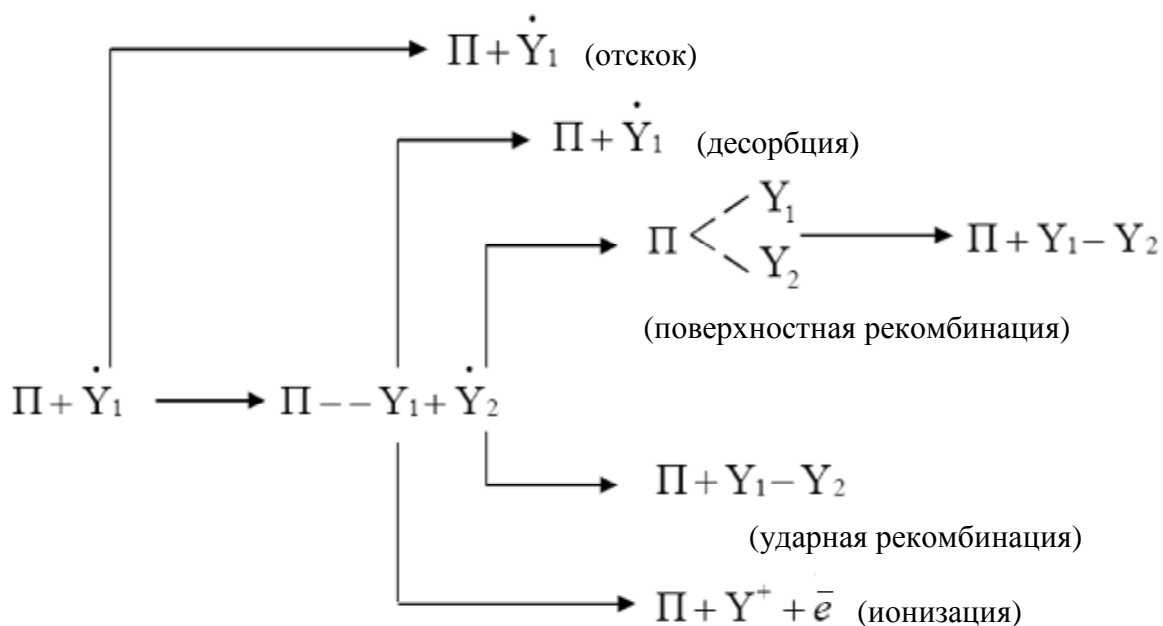


Рис. 7.4.3. Варианты взаимодействия активных центров с поверхностью

Количественно этот процесс характеризуется коэффициентом гетерогенной рекомбинации, который является отношением количества эффективных столкновений активных центров с поверхностью к общему числу столкновений:

$$\gamma = 2rk/\bar{C}, \quad (7.4.12)$$

где  $k$  – константа скорости рекомбинации радикала;

$2r$  – расстояние между ингибирующими «стенками»;

$\bar{C}$  – тепловая скорость радикалов (значение среднеквадратичной скорости теплового движения частиц).

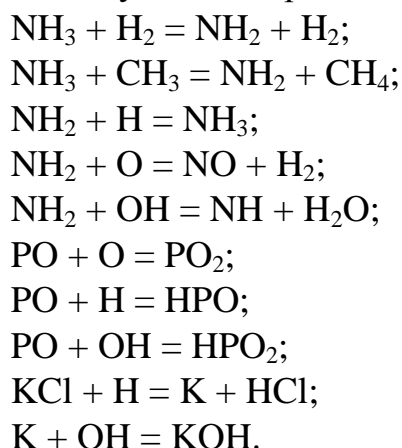
В целом можно заключить, что поверхность порошкового ингибитора работает как:

- адсорбент, уводящий активные центры из реакционной зоны;
- ингибитор реакций разветвления цепей;
- катализатор реакций рекомбинации активных центров.

Поверхностная рекомбинация активных центров пламени, наряду с обрывом цепей, представляет собой также важный канал энергоотвода из реагирующего газа, потому что выделяющаяся в ходе гетерогенной гибели энергия поглощается твердой частицей, т. е. порошковое облако отводит тепло из важнейшей зоны пламени – реакционной.

4. *Гомогенное ингибирование.* Перешедшие в газовую фазу молекулы порошкового ингибитора (в случае испарения) или их «осколки» (в случае разложения), вступая в реакцию с активными центрами пламени (H, O, OH, CH<sub>3</sub> и т. д.), могут замедлить цепной процесс распространения горения в газовой смеси.

Так, при нагревании и испарении солей типа хлористого калия в газовую фазу помимо молекул KCl поступают и продукты их термического распада – атомы калия и хлора; при разложении фосфорно-аммонийных солей – молекулы аммиака, продукты его деструкции и окисления – радикалы NH<sub>2</sub>, NH, оксид NO; при температурах свыше 800 °С и более глубокой деструкции – PO, PO<sub>2</sub>; при разложении NaHCO<sub>3</sub> – диоксид углерода. Некоторые возможные схемы реакций гетерогенного ингибирования выглядят следующим образом:

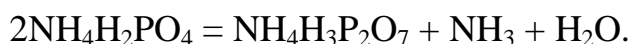


Наиболее эффективно при подобных реакциях ингибируется атомарный кислород, наименее – атомарный водород. Гидроксил-радикал занимает промежуточное положение, однако его реакция взаимодействия с радикалом NH<sub>2</sub> протекает даже без энергетического барьера.

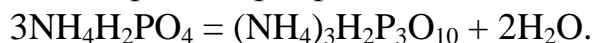
5. *Изолирование нагретой поверхности.* Эффект проявляется как на твердом теле, так и на поверхности жидкостей, где плавающий слой порошка (пока он не утонул) оказывает весьма существенное изолирующее и экранирующее действие. Плавающие компоненты порошков класса А могут успевать испариться в высокотемпературном пламени жидкостей, растворяться в жидкости.

Этот эффект проявляется у порошковых составов, склонных к плавлению и полимеризации при высоких температурах. Процесс образования при этом сплошной пленки плава называют *коалесценцией*.

Например, аммофос при нагревании до 140 °С активно теряет воду и аммиак, а содержащийся в нем диаммонийфосфат практически весь переходит в моноаммонийфосфат. При 190 °С идут уже процессы образования пирофосфата аммония:



После 200 °С в расплаве начинается полимеризация мономерных фосфатов с образованием триполифосфата аммония:



При дальнейшем повышении температуры продолжается полимеризация низших фосфатов до соединений типа  $\text{NH}_4\text{H}_6\text{P}_5\text{O}_{16}$  и т. д. Именно эти соединения и образуют на твердой нагретой поверхности пленки, затрудняющие выход в зону горения горючих паров и поступление кислорода к очагам гетерогенного горения (тления). Общая потеря массы аммофоса при этом достигает 73 %, что свидетельствует о влиянии охлаждения. С введением в порошок инертных добавок (аэросила) склонность к образованию расплава заметно ухудшается. Это ограничивает общее содержание таких добавок в фосфорно-аммонийных порошках на уровне 10 %.

#### **7.4.5. Особенности применения порошков**

Огнетушащие порошки применяются для тушения как небольших локальных очагов, так и развившихся пожаров. Результат тушения зависит от соответствия класса порошка очагу пожара, интенсивности подачи, а также от того, в какой мере были учтены особенности поведения порошкового состава в конкретных условиях.

Являясь летучим материалом, порошки легко уносятся конвективными потоками, затем быстро оседают вне очага пожара, не оказывая огнетушащего действия. Поэтому при тушении следует уделять особое внимание тому, чтобы порошок попадал непосредственно в зону горения (зону пламени), а порошок класса А – также и оседал на поверхности горения, реализуя свою охлаждающую способность.

Основными средствами доставки порошков в зону горения в настоящее время являются переносные и передвижные огнетушители, автомобили порошкового пожаротушения. Для прекращения горения газовых фонтанов самыми эффективными средствами тушения являются импульсные порошковые пламеподавители типа ППП-200.

При использовании устройств струйной подачи во всех случаях тушение следует начинать самой широкой частью струи порошка. Оптимальное расстояние от ствола составляет примерно  $3/4$  длины струи, так как здесь наибольший диаметр струи и достаточно высокая концентрация порошка. При тушении открытых пожаров порошок подают со стороны ветра. Однако следует учитывать, что при этом длина струи возрастает, а концентрация порошка в ней уменьшается.

Порошковое облако обладает очень высокой поглощающей способностью относительно теплового излучения. Поэтому его можно использовать как кратковременный защитный экран для того, чтобы быстро преодолеть высокотемпературную зону.

При тушении твердых горючих материалов во всех случаях рекомендуется в первую очередь самой широкой частью струи подавлять основное пламя, а затем сразу последовательно, короткими подачами обрабатывать все доступные тлеющие поверхности. При этом следует учитывать, что пленка плава практически не растекается по поверхности. Следовательно, в ряде случаев может потребоваться разборка очага и дотушивание скрытых участков. Дотушивание может производиться как порошком, так и водой или пеной низкой кратности. При этом, как показывает практика, интенсивность подачи роли не играет.

Тушение жидкостей осуществляется в зависимости от размеров очага объемно-поверхностным и поверхностным способами. Если диаметр порошковой струи позволяет накрыть всю площадь поверхности очага, огнетушащую концентрацию порошка создают во всем объеме зоны горения и затем порошок подают на поверхность в целях создания изолирующего слоя. В случаях тушения больших площадей порошок подают как пену – на поверхность жидкости, последовательно создавая изолирующий слой.

При этом тушение жидкостей в открытых емкостях (обвалованиях, амбарах, противнях и т. п.) имеет свои особенности. При интенсивной подаче струя порошка может выбросить горящую жидкость из емкости. Поэтому при тушении с помощью огнетушителей или ручных стволов не следует подходить к емкости ближе чем на 2–3 м, а при использовании лафетных стволов – на 12 м. Кроме того, наличие сухого борта может приводить к образованию «мертвых» зон, которые не протушиваются и после прекращения подачи являются источниками повторного распространения пламени на всю поверхность жидкости.

Наибольший объем применения порошковых составов в настоящее время приходится на зарядку переносных и передвижных огнетушителей, которые рассматриваются не иначе как первичные средства пожаротушения, предназначенные для локализации или ликвидации сравнительно небольших локальных очагов.

Однако имеется большой опыт использования боевыми расчетами автомобилей быстрого реагирования (АБР) переносных порошковых огнетушителей при тушении пожаров в жилых и административных помещениях практически на любой стадии развития. Основным видом вооружения АБР на базе микроавтобусов являлись только переносные огнетушащие средства: порошковые огнетушители закачного типа вместимостью 10 кг (8 шт.) и такие же огнетушители (6 шт.), заряженные газодопенным составом (6%-й раствор пенообразователя и  $\text{CO}_2$ ). Последние предназначались для дотушивания тлеющих очагов при разборке и проливке. Так, на тушение экспериментального пожара в жилой комнате площадью 16 м<sup>2</sup>,

находящегося в развившейся стадии (рис. 7.4.4, 7.4.5), расчет АБР использовал 4 порошковых огнетушителя и 2 водопенных. Динамика развития и тушения приведена на рис. 7.4.6.



Рис. 7.4.4. Вид экспериментального очага



Рис. 7.4.5. Вид экспериментального очага после тушения

Первоначально газообмен осуществлялся через щель прикрытой двери и форточку в окне. Горючая нагрузка – деревянная мебель в количестве  $50 \text{ кг/м}^2$ . Источником зажигания служила емкость с бензином (см. рис. 7.4.4). Примерно на 3-й минуте произошла общая вспышка, разрушилось остекление оконной рамы, и пожар стал объемным. Как видно из рис. 7.4.6, приток воздуха сначала несколько понизил температуру газовой среды. Однако примерно через 2 мин она снова стала расти, что характерно для режимов ПРВ.

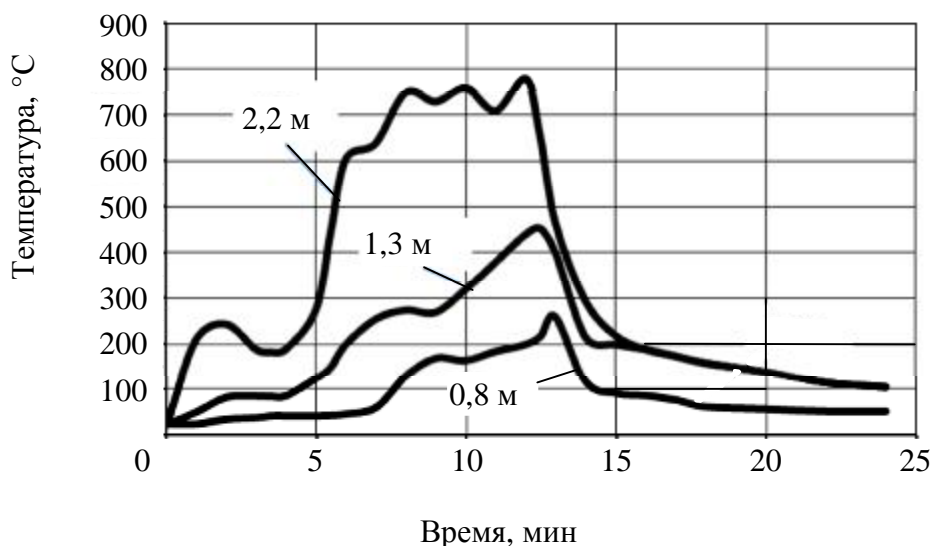


Рис. 7.4.6. Динамика развития и тушения пожара в жилой комнате (площадь пожара 16 м<sup>2</sup>)

Тушение началось на 12-й минуте с момента зажигания, когда температура газовой среды в центре помещения на высоте 2,2 м составила 780 °C; 1,3 м – 450 °C; 0,8 м – 260 °C.

Первая же подача порошка в виде облака в объем помещения привела к снижению температуры газовой среды на всех уровнях за счет ликвидации факела пламени. Все последующие подачи осуществлялись непосредственно на поверхность горящих предметов с одновременной разборкой и проливкой водопенным составом. Как видно из рис. 7.4.6, уже через 3 мин среднеобъемная температура стала ниже температуры пиролиза древесины, что исключало повторное воспламенение. Удельный расход порошка марки ПФ (класс ABC) составил 2,5 кг/м<sup>2</sup>, газоводопенного раствора – 1,25 л/м<sup>2</sup>.

Приемы тушения пожаров в помещениях переносными огнетушителями средствами (порошковыми и газоводопенными огнетушителями) были отработаны в ходе огневых экспериментов на натуральных объектах, а также анализа опыта расчетов АБР.

При тушении пожаров в жилых и административных зданиях в случае сильного задымления и отсутствия интенсивного пламенного горения производится поиск и эвакуация пострадавших, а также обнаружение очага горения. Тушение «по дыму» неэффективно. Собственно тушением в таких ситуациях заняты 1–2 человека.

В случае интенсивного пламенного горения боевой расчет (имеющий соответствующие средства защиты) проникает в помещение под прикрытием облака порошка, используя его способность в течение 1–3 с служить экраном от излучения пламени, и осуществляет ликвидацию участков пламенного

горения короткими подачами порошка на поверхность с одновременным поиском пострадавших и разборкой очага. Практика показала, что в таких случаях тушение в основном ведется одновременной подачей порошка и газоводопенного состава. Зафиксированные удельные расходы порошка и газоводопенного состава не превышают  $4 \text{ кг/м}^2$  и  $4 \text{ л/м}^2$  соответственно и практически не зависят от площади пожара.

Кроме достоинств, следует указать и определенные недостатки в применении огнетушащих порошков:

1. Выпуск большого количества огнетушащего порошка может оказать вредное влияние на находящиеся поблизости людей. Образующееся непрозрачное облако может значительно ухудшить видимость и затруднить дыхание.

2. Как и другие огнетушащие вещества, не содержащие воды, огнетушащие порошки плохо тушат пожары, связанные с горением материалов, в состав которых входит кислород.

3. Огнетушащий порошок может оставить осевший слой на радиоэлектронном оборудовании, влияющий на его работу.

4. При тушении горючих металлов, таких как магний, калий, натрий и их сплавы, порошок общего назначения не дает огнетушащего эффекта, а в некоторых случаях может вызвать бурную химическую реакцию.

5. В местах, где имеется влага, огнетушащий порошок может вызвать коррозию или деформацию поверхности, на которой он осаждается.

6. При подаче порошков от автомобилей порошкового тушения следует учитывать то, что порошок передавливается по рукаву в псевдосжиженном состоянии и при слишком большой длине рукавной линии может осесть, что приведет к закупорке рукава и невозможности дальнейшей подачи порошка. Для основных автомобилей порошкового тушения максимальная длина рабочих линий обычно принимается равной 40 м.

Совмещение порошков с другими огнетушащими веществами во многих случаях позволяет повысить общую эффективность пожаротушения.

Так, огнетушащие порошки разных классов можно подавать на тушение одновременно. Но разные порошки не следует смешивать в одной емкости, так как некоторые из них имеют кислотную основу, а другие щелочную, и их перемешивание может вызвать повышение давления в емкости или образование крупных комков.

При тушении пожаров класса D необходимо использовать тот тип порошка, который непосредственно предназначен для тушения данного металла, сплава или соединения.

Увеличить огнетушащий эффект при тушении по поверхности порошками классов ВСЕ можно, используя комбинированное тушение одновременно порошком и водой.

Многие виды огнетушащей пены разрушаются под воздействием огнетушащего порошка. Но «легкая вода» (пенообразователь класса AFFF) может применяться совместно с порошком на основе бикарбоната калия. При этом каждое огнетушащее вещество подается в очаг по отдельной линии. На судах, оборудованных системами пенного тушения, могут использоваться только огнетушащие порошки, совместимые с пеной.

### Контрольные вопросы

1. Что такое огнетушащие порошки?
2. Каковы преимущества порошков перед другими средствами?
3. При тушении каких объектов применяются порошки?
4. Каковы недостатки порошков?
5. Как классифицируют огнетушащие порошки?
6. Назовите типы порошков по областям применения.
7. Какие компоненты входят в состав порошка?
8. Назовите наиболее распространенные «основы» порошков.
9. Какие свойства порошков влияют на хранение, применение и их эффективность при тушении?
10. Перечислите механизмы огнетушащего действия порошков.
11. За счет каких физических свойств порошка реализуются эффекты охлаждения и огнепреграждения?
12. В чем заключается эффект гетерогенного ингибирования?
13. Приведите примеры реакций гомогенного ингибирования.
14. У порошков на какой «основе» проявляется эффект изоляции поверхности горячего?
15. С какими огнетушащими веществами можно комбинировать подачу порошков?

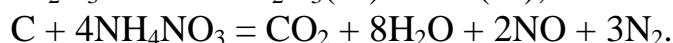
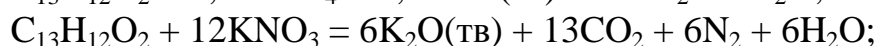
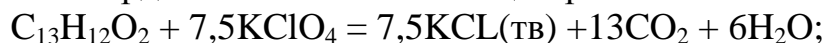


## 7.5. Аэрозолеобразующие огнетушащие составы

### 7.5.1. Состав аэрозолеобразующих композиций

Аэрозольные (аэрозолеобразующие) огнетушащие составы (АОС) представляют собой твердотопливные композиции, основой которых являются горючие смеси кислородсодержащих и горючих компонентов с целевыми и технологическими добавками.

При реакции горения таких композиций выделяется смесь твердых (собственно аэрозоль) и газообразных продуктов горения, которая и образует огнетушащую газообразную смесь витающих частиц аэрозоля размером 0,5–2,5 мкм и нейтральных газов. В качестве горючего может выступать *идитол* (фенолформальдегидная смола  $C_{13}H_{12}O_2$ ), окислителя – *перхлорат* или *нитрат калия* ( $KClO_4$ ,  $KNO_3$ ). Ниже представлены типовые реакции горения твердотопливных композиций различного назначения:



Анализ подобных реакций говорит о том, что их продуктами горения могут быть и бесполезные для пожаротушения вещества, такие как при реакции оксида железа с алюминиевой пудрой («термит»). В этом случае газообразные продукты не выделяются вообще.

В других случаях можно получить исключительно газообразные продукты, например при использовании в качестве окислителя аммиачной селитры ( $NH_4NO_3$ ).

В целом рецептуру аэрозолеобразующих составов (АОС) принято разделять на:

1. **Базовые компоненты** – обеспечивают протекание устойчивой самоподдерживающейся реакции горения. К ним относят:

– *горючую основу* (фенолформальдегидная смола, эпоксидные диановые смолы, полиэфирные смолы, синтетические каучуки, смеси нитроцеллюлозы с пластификаторами);

– *окислители* (нитрат калия, перхлорат калия, нитрат натрия или бария).

2. **Целевые компоненты** – обеспечивают требуемые для практического применения физико-химические и эксплуатационные характеристики зарядов. Это могут быть *дициандиамида* (увеличивает производительность и снижает  $T_r$ ), *порошок магния*, *хроматы калия и аммония* (интенсифицируют горение), *карбонат калия*, *магния*, *хлорид натрия*, *калия* (снижают  $T_r$ ).

3. **Технологические компоненты** – вводят для обеспечения технологичности, экономичности и безопасности производства зарядов.

Характеристики некоторых твердотопливных композиций (ТТК) представлены в табл. 7.5.1 [21].

Таблица 7.5.1

**Характеристики ТТК-4 и ТТК-6**

Характеристика ТТК	ТТК-4	ТТК-6
<i>Состав ТТК:</i>		
Органическая смола, % масс.	20,0	26,0
KNO <sub>3</sub> , % масс.	35,0	31,6
KClO <sub>4</sub> , % масс.	45,0	42,4
<i>Продукты горения:</i>		
KCl, % об.	0,60	0,66
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , % об.	0,80	0,84
CO <sub>2</sub> , % об.	2,28	4,97
O <sub>2</sub> , % об.	20,87	18,4
N <sub>2</sub> , % об.	75,0	74,5
H <sub>2</sub> O, % об.	0,45	0,63
<i>Характеристики горения:</i>		
Теплота сгорания, кДж/кг	3100	2950
Скорость горения, мм/с	0,66	0,45
Огнетушащая концентрация, кг/м <sup>3</sup>	0,05	0,04
Температура аэрозоля, °С	1590	1550

Горение твердотопливных составов представляет собой совокупность многих экзо- и эндотермических реакций, диффузии и теплопередачи. В общем случае для протекания устойчивой реакции горения требуется равенство тепловыделения и теплоотвода во всех зонах реакции. Условно в процесс горения твердотопливного состава можно выделить несколько зон:

- зона прогрева состава;
- зона реакции в конденсированной фазе;
- зона смешения непрореагировавших компонентов;
- зона реакции в газовой фазе;
- зона конденсации продуктов реакции с образованием аэрозоля;
- зона транспортирования и охлаждения аэрозоля.

### 7.5.2. Устройство генераторов огнетушащего аэрозоля

Для установки на защищаемых объектах, обеспечения длительной эксплуатации, запуска аэрозоля в случае пожара и требуемых характеристик аэрозольной струи заряд аэрозолеобразующего состава помещают в специальное устройство – *генератор огнетушащего аэрозоля*. В настоящее

время существует множество типов генераторов, различающихся защищаемым объемом и другими техническими характеристиками (рис. 7.5.1).



Рис. 7.5.1. Принципиальное устройство генератора огнетушащего аэрозоля

Введение в устройство *охлаждителя* связано в первую очередь с тем, что собственно двухкомпонентная газоаэрозольная смесь образуется лишь по мере охлаждения газообразных продуктов горения заряда, которые в генераторе, а иногда даже на выходе из него, имеют температуру, близкую к температуре горения, – более 1000 °С. Если же применяются какие-то технические средства, ведущие к значительному снижению температуры еще внутри корпуса генератора, то часть аэрозоля может, образовавшись там, осесть на внутренних поверхностях, что ведет к снижению количества аэрозоля, пошедшего на тушение, и, как следствие, снижению эффективности работы генератора (рис. 7.5.2).



Рис. 7.5.2. Схема генерации аэрозоля

В технических описаниях генераторов оговариваются размеры трех температурных зон (расстояние от среза или торца генератора), в которых максимальная температура не превышает:

- 75 °С – для 1-й зоны;
- 200 °С – для 2-й зоны;
- 400 °С – для 3-й зоны.

При этом размещение генератора в помещении должно исключать возможность воздействия:

а) зоны с температурой более 75 °С – на персонал, находящийся в защищаемом помещении или имеющий доступ в данное помещение (на случай несанкционированного или ложного срабатывания генератора);

б) зоны с температурой более 200 °С – на хранимые или обращающиеся в защищаемом помещении сгораемые вещества и материалы, а также сгораемое оборудование;

в) зоны с температурой более 400 °С – на другое оборудование.

Существование подобных высокотемпературных зон обуславливает и основной недостаток аэрозольного пожаротушения – большинство генераторов могут представлять пожарную опасность в случае самосрабатывания. Избежать этого можно либо установкой генератора в зоне, где аэрозольная струя не оказывает непосредственного воздействия на пожароопасные вещества и предметы, либо выбором генератора с минимальной низкой температурой аэрозоля на выходе, пусть и в ущерб количеству выделяемого генератором аэрозоля.

Другим недостатком аэрозолей как огнетушащих веществ является их высокая летучесть, практически аналогичная газовым огнетушащим составам, поэтому помещения, оборудуемые установками аэрозольного пожаротушения, требуется дополнительно герметизировать, принимать меры по ликвидации технологически необоснованных проемов и против самооткрывания дверей вследствие избыточного давления.

Основная область применения генераторов огнетушащего аэрозоля (ГОА) – это тушение пожаров классов А (подкласс А2), В, С по ГОСТ 27331 и электрооборудования под напряжением до 35000 В в замкнутых (ограниченно открытых) объемах, на объектах промышленного, бытового, технического, складского и т. д. назначения.

Это, например, могут быть двигательные, приборные и багажные отсеки авто-, авиа- и железнодорожного транспорта, морских и речных судов, контейнеры, радио- и телеаппаратура, компьютеры, мониторы, серверы, вычислительные центры, архивы, приборы, электрошкафы, электрощиты, кабельные шахты, электрические подстанции, производственные и складские помещения, гаражи, фальшпотолки и подпольные пространства, станции автозаправочные, газораздаточные и нефтеперекачки, хранилища материальных ценностей.

Некоторые существующие ограничения в применении систем аэрозольного пожаротушения определяются действующими нормами. Но следует отметить несовершенство требований к системам защиты и практики проектирования противопожарной защиты объектов. Недостатком норм является то, что они необоснованно ограничивают применение действующих

генераторов аэрозольного пожаротушения в помещениях объемом более 10 тыс. м<sup>3</sup>. Просто испытания на объемы более 10 тыс. м<sup>3</sup> никто не проводил. Такая же картина и с требованиями по ограничению высоты здания. Экспертно принята высота здания не более 10 м, тогда как есть концептуальная разработка даже на тушение Останкинской башни, для высоты более 500 м. Нормы очень строго регламентируют герметичность помещений, и она учитывается при проектировании. Однако практика показывает, что требования по герметичности также завышены.

В ряде ведомственных нормативных документов не обосновано ограничение аэрозольного пожаротушения для помещений с радиоэлектронной аппаратурой. Это требование основано на предположении о том, что аэрозоль имеет высокую проникающую способность, и если произойдет ложное срабатывание установки, то он принесет непоправимый ущерб аппаратуре. Проводились исследования влияния аэрозоля на различные электронные платы (на действующей телефонной станции). Они показали, что указанное опасение сильно завышено и существенного ущерба аэрозоль не несет, если обеспечивается его своевременная сухая уборка. Аэрозоль может вызвать коррозию и вступать в реакцию с металлами только во влажном состоянии.

Аэрозольные огнетушащие составы имеют и объективные ограничения в применении, например, они не обеспечивают полного прекращения горения (ликвидации пожара) и не должны применяться для тушения:

- волокнистых, сыпучих, пористых и других горючих материалов, склонных к самовозгоранию или тлению внутри слоя вещества (осевшие горючие пыли, древесные опилки, хлопок, травяная мука и др.);
- химических веществ и их смесей, полимерных материалов, склонных к тлению и горению без доступа воздуха;
- гидридов металлов и пирофорных веществ;
- порошков металлов (магний, титан, цирконий и др.).

### **7.5.3. Классификация огнетушащих аэрозолей**

В зависимости от основных физико-химических, технологических, прочностных, экологических и других наиболее важных эксплуатационных свойств АОС условно классифицируют:

1. По огнетушащей способности:

- высокоэффективные – с удельным расходом не более 50 г/м<sup>3</sup>;
- с повышенной огнетушащей способностью – не более 100 г/м<sup>3</sup>;
- эффективные составы – 100–200 г/м<sup>3</sup>;
- составы средней эффективности – 200–500 г/м<sup>3</sup>.

2. По экологической безопасности:
  - экологически безопасные (коэффициент относительного озоноразрушающего действия равен нулю, класс опасности по токсичности аэрозолей в соответствии с ГОСТ 12.1.044–89 – малоопасные);
  - экологически малоопасные (КОД < 0,1, класс опасности по ГОСТ 12.1.044–89 – умеренноопасные).
3. По эксплуатационной безопасности:
  - легковоспламеняющиеся умеренноопасные (с температурой самовоспламенения  $T_{св} > 450$  °С, температурой горения  $T_r < 1000$  °С, линейной скоростью горения  $V_{л} < 5$  мм/с);
  - легковоспламеняющиеся повышенной опасности ( $T_{св} = 300\div 450$  °С,  $T_r = 1000\div 1500$  °С,  $V_{л} < 10$  мм/с);
  - легковоспламеняющиеся высокоопасные ( $T_{св} \leq 300$  °С,  $T_r > 1500$  °С,  $V_{л} > 10$  мм/с).
4. По температуре горения:
  - низкотемпературные ( $T_r < 800$  °С);
  - среднетемпературные ( $T_r = 800\div 1000$  °С);
  - с повышенной температурой горения ( $T_r = 1000\div 1500$  °С);
  - высокотемпературные ( $T_r > 1500$  °С).
5. По скорости горения:
  - медленногорящие ( $V_{л} < 1$  мм/с);
  - умеренногорящие ( $V_{л} = 1\div 5$  мм/с);
  - быстрогорящие ( $V_{л} = 5\div 10$  мм/с);
  - высокоскоростные ( $V_{л} > 10$  мм/с).
6. По газопроизводительности:
  - низкой газопроизводительности (< 0,2 л/г);
  - средней газопроизводительности (0,2–0,4 л/г);
  - повышенной газопроизводительности (0,4–0,7 л/г);
  - высокой газопроизводительности (> 0,7 л/г).
7. По кислородному балансу (коэффициенту обеспеченности окислителем):
  - с отрицательным кислородным балансом ( $\alpha_{ок} < 1$ );
  - с нулевым кислородным балансом ( $\alpha_{ок} = 1$ );
  - с положительным кислородным балансом ( $\alpha_{ок} > 1$ ).
8. По допустимому температурному диапазону эксплуатации заряда:
  - нормальной термостойчивости (до 30–40 °С);
  - повышенной термостойчивости (до 40–50 °С);
  - высокой термостойчивости (до 50–70 °С).

Также АОС можно классифицировать по гигроскопичности, прочности, технологии изготовления и другим характеристикам.

### 7.5.4. Основные механизмы огнетушащего действия аэрозольных огнетушащих составов

1. Разбавление горючей среды газообразными продуктами реакции горения (флегматизация зоны горения). При этом происходит снижение концентрации и горючего  $\phi_r$  и окислителя  $\phi_{ок}$  в зоне реакции и, как следствие, – уменьшение числа активных соударений и скорости реакции.

2. Дополнительное снижение концентрации кислорода в зоне реакции еще на 1–4 % вследствие догорания недоокисленных продуктов реакции АОС с отрицательным кислородным балансом  $\alpha_{ок} < 1$ .

3. Ингибирование химических реакций в пламени образовавшимися частицами аэрозоля. Химически активными ингибиторами при этом выступают  $K_2CO_3$ ,  $KHSO_3$ ,  $KOH$ ,  $KCl$ ,  $K_2O$ ,  $KO$  (рис. 7.5.3).

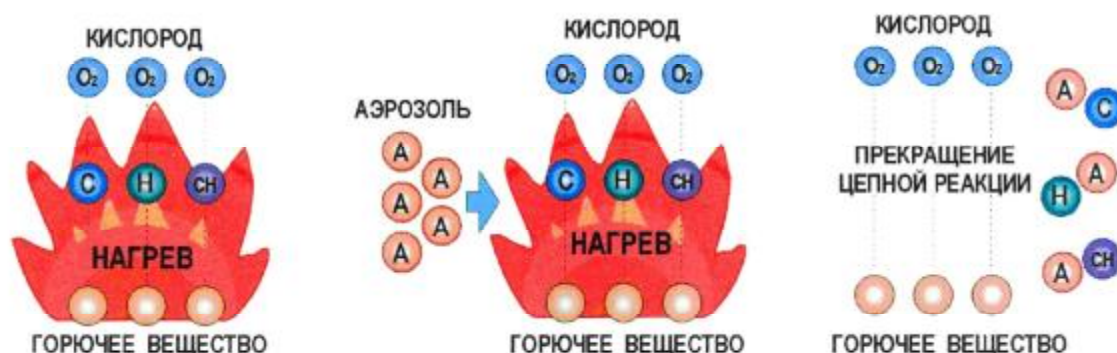


Рис. 7.5.3. Механизм ингибирующего действия аэрозолей

4. Охлаждение зоны горения массой образовавшегося аэрозоля. Например, если состав получившегося аэрозоля соответствует  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$  в количестве 50 % массы и  $CO_2$  в количестве 50 %, то суммарный тепловой эффект нагрева складывается из нескольких составляющих:

– нагрев массы  $CO_2$  до температуры горения:

$$Q_1 = mC_p^*(T_r - T_0); \quad (7.5.1)$$

– нагрев массы  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$  до температуры отщепления воды:

$$Q_2 = m_1C_p^{**}(T_{-H_2O} - T_0); \quad (7.5.2)$$

– теплота отщепления воды:

$$Q_3 = m_1L_{-H_2O}; \quad (7.5.3)$$

– нагрев выделившейся воды до температуры пламени:

$$Q_4 = m_2C_p^{***}(T_r - T_{-H_2O}); \quad (7.5.4)$$

– нагрев массы  $K_2CO_3$  до температуры плавления:

$$Q_5 = m_3C_p^{****}(T_{пл} - T_{-H_2O}); \quad (7.5.5)$$

– теплота плавления массы  $K_2CO_3$ :

$$Q_6 = m_3 L_{\text{плавл}}; \quad (7.5.6)$$

– теплота разложения массы  $K_2CO_3$  на  $K_2O + CO_2$ :

$$Q_7 = m_3 L_{\text{разл}}^*; \quad (7.5.7)$$

– нагрев до температуры пламени массы выделившегося  $CO_2$ :

$$Q_8 = m_4 C_p^* (T_{\text{г}} - T_0); \quad (7.5.8)$$

– теплота разложения массы  $K_2O$  на  $KO + K$ :

$$Q_9 = m_5 L_{\text{разл}}^{**}. \quad (7.5.9)$$

Суммарный тепловой эффект охлаждения массой аэрозоля при этом составляет около 5290 кДж/кг, т. е. намного больше, чем у огнетушащих порошков и даже немного выше, чем у распыленной воды.

Совместное же действие всех представленных огнетушащих механизмов обуславливает высокую эффективность аэрозольного тушения. Флегматизирующая концентрация аэрозолей, определенная на установке «Предел» (конструкция ВНИИПО) по методике, аналогичной для нейтральных газов и химически активных ингибиторов, составляет  $\varphi_{\text{АОС}} = 45 \div 150 \text{ г/м}^3$ . Для нейтральных газов она составляет  $\varphi_{\text{НГ}} \approx 600 \text{ г/м}^3$ , а для ХАИ –  $\varphi_{\text{ХАИ}} = 220 \div 370 \text{ г/м}^3$ . Столь высокая огнетушащая способность аэрозолей является их основным преимуществом перед другими газовыми огнетушащими составами. Другими достоинствами применения аэрозолей считается то, что они не разрушают озоновый слой (в отличие от многих ХАИ), а также простота хранения и использования зарядов.

Сравнительные характеристики АОС и некоторых других объемных средств пожаротушения приведены в табл. 7.5.2.

Таблица 7.5.2

**Характеристики аэрозольных, газовых и порошковых составов**

Показатель огнетушащих веществ (ОТВ)	Хладон 114В2	Хладон 113В1	$N_2$	$CO_2$	Порошок ПСБ-3	АОС
Огнетушащая концентрация (для органических горючих), $кг/м^3$	0,22–0,37	0,33	0,6–0,8	0,6–0,7	0,5–0,7	0,04–0,06
Содержание кислорода в объеме после подачи ОТВ, %	20,4	20,2	13,4	16,2	н. у.	20,0
Безопасная для человека концентрация (без средств защиты), $кг/м^3$	0,11–0,18	0,44–0,63	0,94	0,185	–	0,06
Коэффициент озоноразрушающего действия	4	10	0	0	0	0



Показатель огнетушащих веществ (ОТВ)	Хладон 114В2	Хладон 113В1	N <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	Порошок ПСБ-3	АОС
Скорость коррозии металлов, сплавов, мм/год: – в среде с влажностью не более 70 %;	0,0003–0,0004	< 0,0003	< 0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
– в среде с высокой влажностью (90–98 %)	0,03–0,3	0,03–0,3	0,0003	0,0003	0,0003–0,005	0,0003–0,005
Температура использования ОТВ, °С	–35...+50	–50...+50	–50...+50	–35...+50	–50...+50	±60
Объем герметичного помещения, защищаемый 1 кг ОТВ, м <sup>3</sup>	2,7–4,5	3,0	1,25–1,7	1,4–1,7	1,4–2,0	17–25

Примечание: н. у. – не установлено.

### 7.5.5. Оценка времени тушения огнетушащим аэрозолем

Время тушения пожара огнетушащим аэрозолем может быть приблизительно рассчитано по времени охлаждения облака аэрозоля в помещении от начальной температуры (на выходе генератора) до температуры окружающей среды [22], при которой в наибольшей степени будет проявляться охлаждающий эффект аэрозоля. Именно в этом случае в наибольшей степени проявляется охлаждающий эффект частиц аэрозоля в зоне горения.

Оценку времени охлаждения облака аэрозоля можно провести путем решения уравнения теплового баланса:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \alpha \frac{S}{V} (T - T_c), \quad (7.5.10)$$

где  $c$  – теплоемкость аэрозоля, кДж/(кг·К);

$\rho$  – плотность аэрозоля, кг/м<sup>3</sup>;

$T, T_c$  – температура аэрозоля и температура окружающей среды, К;

$t$  – время, с;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена, кДж/(м<sup>2</sup>·с·К);

$S$  – площадь поверхности охлаждаемого облака аэрозоля, м<sup>2</sup>;

$V$  – объем облака, м<sup>3</sup>.

Это уравнение решается при начальных условиях:

$$T = T_0; \quad t = 0,$$

где  $T_0$  – начальная температура аэрозоля, К.

После интегрирования получаем

$$\ln(T - T_c) = -\frac{\alpha S t}{c \rho V} + \ln C' \quad (7.5.11)$$

и далее

$$T - T_c = C' \exp\left(-\frac{\alpha S t}{c \rho V}\right). \quad (7.5.12)$$

С учетом начальных условий получаем:  $C' = T_0 - T_c$ .

И после подстановки  $C'$ :

$$T = T_c + (T_0 - T_c) \exp\left(-\frac{\alpha S t}{c \rho V}\right). \quad (7.5.13)$$

Для дальнейшего расчета введем безразмерные переменные

$$\Theta = \frac{(T - T_c)}{(T_0 - T_c)}; \quad \tau = \frac{\alpha S t}{c \rho V},$$

в качестве масштаба времени введем комплекс – время тепловой релаксации:

$$\tau_{т.р} = \frac{c \rho V}{\alpha S}.$$

После подстановки переменных  $\Theta$  и  $\tau$  получаем:

$$\Theta = e^{-\tau}. \quad (7.5.14)$$

Из этого равенства следует, что при  $\tau = 2,3$  облако аэрозоля охладится на 90 % (то есть когда  $\Theta = 0$  или 10 % от первоначального разогрева, которому соответствует  $\Theta = 1$ ). Если, например, принять, что полное охлаждение достигается при  $\Theta = 0,01$ , то безразмерное время охлаждения составит  $\tau = 4,6$  и полное размерное время охлаждения будет

$$\tau_{охл} = 4,6 \tau_{т.р} = 4,6 \frac{c \rho V}{\alpha S}. \quad (7.5.15)$$

Значение коэффициента теплообмена  $\alpha$  можно получить с помощью уравнения

$$\alpha = \text{Nu}_m \frac{\lambda}{l}, \quad (7.5.16)$$

где  $\text{Nu}_m$  – тепловое число Нуссельта;

$\lambda$  – теплопроводность аэрозоля, Вт/(м·К);

$l$  – поперечный размер облака, м.

Значение числа Нуссельта рассчитывается по уравнению

$$\text{Nu}_m = C^m (\text{Gr Pr})^n, \quad (7.5.17)$$

где  $\text{Gr}$  – число Грасгофа;

$\text{Pr}$  – число Прандтля;

$C^m$  и  $n$  – постоянные, зависящие от режима конвективного движения, характеризуемого величиной комплекса  $(GrPr)$ . Значения  $C^m$ ,  $n$  и  $Pr$  выбираются по справочным данным.

Число Грасгофа можно рассчитать по формуле

$$Gr = g l^3 \beta \frac{\Delta T}{\nu^2}, \quad (7.5.18)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  
 $\nu$  – вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $\beta = 1 / T_c$ ;  
 $\Delta T = T_0 - T_c$ .

Для дальнейших расчетов с учетом имеющихся экспериментальных данных можно принять: удельный расход ТТК равен  $0,08 \text{ кг/м}^3$ ; средняя температура в помещении  $T_{cp} = 873 \text{ }^\circ\text{C}$ ; состав облака аэрозоля: 50 % газовой фазы ( $\text{CO}_2$ ), 50 % конденсированной фазы ( $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ); тушение очага 13В в помещении объемом  $70 \text{ м}^3$  и площадью  $23,3 \text{ м}^2$ ; форма облака аэрозоля при подъеме принята сферической, а после растекания под потолком – параллелепипед, с площадью основания, равной площади помещения; теплота сгорания АОС  $3000 \text{ кДж/кг}$ .

В результате расчетов получается:

$$\Theta = 0,136 \text{ и } \tau = 1,995, \text{ значение } \alpha = 9,989 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Подставив рассчитанные значения показателей в уравнения, окончательно получим значение  $\tau_{охл} = 200 \text{ с}$ .

В опытах, проведенных в помещении высотой 3 м, время тушения составило около 120 с. Если учесть допущенные приближения, то можно видеть, что соответствие расчетов результатам экспериментов является вполне удовлетворительным.

Таким образом, проведенный анализ подтверждает тот факт, что увеличение времени тушения связано с высокой степенью нагретости аэрозоля. Причем время охлаждения аэрозоля линейно увеличивается с высотой помещения.

Из изложенного следует, что для повышения эффективности аэрозольного пожаротушения необходимо обеспечивать максимальное охлаждение аэрозоля уже в момент его получения.

На сегодняшний день разработаны следующие методы и устройства, обеспечивающие эффективное охлаждение аэрозоля:

1. *Введение в поток аэрозоля жидкостного охладителя.* Для реализации этого метода предложено эжекционное устройство (струйный насос), в котором в качестве рабочего тела выступает аэрозоль, получаемый в камере сгорания, а в качестве охладителя – вода или водные растворы солей щелочных металлов, например хлорида калия. Такие устройства испытывались на резервуарах с нефтепродуктами и газоконденсатом от 10 до

1000 м<sup>3</sup>. В процессе испытаний было установлено, что температура аэрозоля на выходе генератора не превышала 60 °С, форс пламени отсутствовал полностью.

К сожалению, недостатками таких устройств является необходимость хранить значительные объемы жидкого охладителя и обеспечивать его сохранность – препятствовать испарению и т. п.

2. *Барботирование аэрозоля через слой жидкости.* Этот метод перспективен для защиты резервуаров с ЛВЖ и ГЖ. Заключается он в том, что аэрозоль подается непосредственно в нижнюю часть резервуара и всплывает в верхнюю часть за счет разности плотностей аэрозоля и жидкости. Причем аэрозоль можно подавать как от генератора, расположенного вне резервуара, через специальную арматуру, так и с помощью работающего генератора, помещенного непосредственно в слой жидкости. Данный метод испытывался на моделях резервуаров и дал значение огнетушащего расхода аэрозоля от 0,4 до 1,2 кг/м<sup>2</sup> поверхности жидкости.

Недостатком этого способа является необходимость установки специальной арматуры на резервуаре и необходимость принятия специальных мер антикоррозионной защиты генераторов и защиты от отложений при их стационарной установке, особенно непосредственно в слое жидкости. Испытаний на действующих резервуарах данного способа тушения еще не проводилось, но он потенциально является достаточно перспективным.

3. *Поглощение тепла аблирующим материалом.* Этот метод оказался наиболее приемлемым для защиты различных помещений и сооружений. Он обеспечивает получение аэрозоля с температурой ниже 200 °С и надежное устранение открытого форса пламени. Заключается он в пропускании продуктов горения аэрозолеобразующего состава через лабиринт каналов, набор сеток или засыпку гранулированного теплопоглощающего материала, например огнетушащего порошка. При этом, кроме значительного снижения температуры, состав аэрозоля может обогащаться и испарившимися частицами порошка, что может значительно увеличивать ингибирующую способность аэрозолей.

Недостатком этого способа охлаждения является то, что при попытке значительно снизить температуру резко уменьшается количество образующегося аэрозоля, так как большая часть его оседает на охлаждающих поверхностях и остается внутри генератора.

### Контрольные вопросы

1. Что такое огнетушащие аэрозоли?
2. Какие компоненты входят в состав аэрозолеобразующих композиций?
3. Приведите характерные примеры реакций горючей основы и окислителя.

4. Зачем требуется охладитель в конструкции генератора аэрозоля?
5. Каковы области применения аэрозольного пожаротушения?
6. Каковы ограничения применения аэрозольного пожаротушения?
7. Назовите принципы классификации огнетушащих составов.
8. Что такое кислородный баланс АОС?
9. Перечислите механизмы огнетушащего действия аэрозолей.
10. В чем заключается механизм ингибирования реакции горения аэрозолем?
11. Из каких составляющих может складываться тепловой эффект охлаждения аэрозолем?
12. Какие существуют способы охлаждения потока подаваемого на тушение аэрозоля?

## Литература

---

1. *Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е.* Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980.
2. *Андросов А. С., Бегиев И. Р., Салеев Е. П.* Теория горения и взрыва : учеб. пособие. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2007. – 240 с.
3. *Безродный И. Ф., Гилетич А. Н., Меркулов В. А.* и др. Тушение нефти и нефтепродуктов. – М. : ВНИИПО, 1996. – 214 с.
4. *Блинов В. И., Худяков В. Н.* Диффузионное горение жидкостей. – М. : АН СССР, 1961. – 209 с.
5. *Драйздейл Д.* Введение в динамику пожаров / пер. с англ. К. Г. Бомштейна ; под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. – М. : Стройиздат, 1990. – 162 с.
6. *Koseki Hiroshi* Combustion properties of large liquid pool fires / *Fier technol.* – 1989, v. 25, № 3. – P. 241–255.
7. *Волков О. М.* Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М. : Недра, 1984.
8. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. – М. : ВНИИПО, 1999. – 29 с.
9. *Исаева Л. К.* Основы экологической безопасности при природных катастрофах. – М., 2003.
10. *Бережной С. А., Еношевский Б. А., Колесин В. Н.* и др. Охрана труда в торфяной промышленности. – М. : Недра, 1989.
11. *Чулюков М. А., Чайков В. И.* Торфяные пожары и меры борьбы с ними. – М. : Недра, 1969.
12. *Софронов М. А., Волокитина А. В.* Современные методы профилактики, обнаружения и тушения лесных пожаров / тез. докл. участников Всес. научн.-техн. совещ., Петрозаводск, 8–9 апреля 1985. – М., 1985.
13. *Никитин Ю. А., Рубцов В. Ф.* Предупреждение и тушение пожаров в лесах и на торфяниках. – М. : Россельхозиздат, 1986.
14. *Ефремова Т. Т., Ефремов С. П.* Экология. – № 5–6. – Екатеринбург, 1994.
15. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. – М. : Стройиздат, 1988. – 447 с.
16. *Молчадский И. С.* Пожар в помещении. – М. : ВНИИПО, 2005. – 456 с.
17. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. изд. : в 2 кн. / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. и др. – М. : Химия, 1990. – 496 с.
18. *Петров И. И., Реутт В. Ч.* Тушение пламени горючих жидкостей. – М. : Изд-во МКХ РСФСР, 1961. – 66 с.
19. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. – М. : Атомиздат, 1979. – 300 с.
20. *Горшков В. И.* Тушение пламени горючих жидкостей. – М. : Пожнаука. – 268 с.
21. *Агафонов В. В., Копылов Н. П.* Установки аэрозольного пожаротушения. – М., 1999. – 302 с.
22. *Баратов А. Н.* Горение – пожар – взрыв – безопасность. – М. : 2003. – 363 с. : ил.

# Оглавление

---

Предисловие .....	3
<b>1. Пожар как комплекс физических и химических процессов и явлений.</b>	
<b>Основные понятия и определения</b>	
1.1. Основные процессы, протекающие на пожаре.....	4
1.2. Зоны пожара.....	7
1.3. Основные параметры пожаров.....	9
<b>2. Пожары газовых фонтанов</b>	
2.1. Виды фонтанов .....	13
2.2. Характеристики горения газовых фонтанов.....	15
2.3. Параметры газовых фонтанов. Оценка их значений .....	18
<b>3. Пожары резервуаров</b>	
3.1. Возникновение и развитие пожара на резервуаре .....	24
3.2. Параметры пожара резервуара.....	29
3.3. Распределение температуры в жидкости по высоте резервуара .....	34
3.4. Вскипание и выброс жидкости при горении в резервуаре.....	38
<b>4. Открытые пожары твердых горючих материалов</b>	
4.1. Классификация твердых горючих материалов.....	43
4.2. Общие закономерности воспламенения и горения твердых горючих материалов.....	45
4.3. Распространение пламени по поверхности твердых горючих материалов.....	46
4.4. Горение пылей .....	50
4.5. Пожары полигонов твердых бытовых отходов (свалок).....	52
4.6. Лесные пожары.....	53
4.7. Особенности горения лесных материалов .....	62
4.8. Тушение лесных пожаров.....	64
4.9. Последствия лесных пожаров .....	65
<b>5. Внутренние пожары</b>	
5.1. Возникновение и развитие газообмена при пожаре. Его основные параметры .....	67
5.2. Тепловой баланс помещения при пожаре.....	73
5.3. Режимы внутренних пожаров .....	74
5.4. Динамика внутренних пожаров .....	76
<b>6. Прекращение горения на пожаре</b>	
6.1. Тепловая теория прекращения горения .....	86
6.2. Способы достижения температуры потухания .....	89
6.3. Физико-химические способы прекращения горения на пожаре .....	92
6.4. Классификация огнетушащих веществ. Условия, необходимые и достаточные для прекращения горения.....	96
6.5. Параметры процесса тушения.....	99

## 7. Огнетушащие вещества

7.1. Газовые огнетушащие составы .....	103
7.1.1. Нейтральные газы.....	103
7.1.2. Химически активные ингибиторы.....	114
7.1.3. Озоноразрушающее действие хладонов .....	118
7.1.4. Параметры тушения газовыми огнетушащими составами .....	119
7.2. Вода и водные растворы.....	124
7.2.1. Основные физико-химические свойства воды .....	124
7.2.2. Механизм огнетушащего действия воды.....	129
7.2.3. Параметры тушения водой .....	137
7.2.3.1. Прекращение горения газовых фонтанов .....	137
7.2.3.2. Прекращение горения жидкостей.....	141
7.2.3.3. Прекращение горения твердых горючих материалов .....	144
7.2.3.4. Коэффициент использования воды при тушении твердых горючих материалов .....	147
7.2.3.5. Повышение коэффициента использования воды при тушении пожаров твердых горючих материалов .....	152
7.3. Пены как огнетушащие вещества.....	155
7.3.1. Структура пен.....	155
7.3.2. Способы получения пен .....	156
7.3.3. Параметры пен.....	157
7.3.4. Механизм огнетушащего действия пен .....	159
7.3.5. Виды разрушения пен.....	160
7.3.6. Классификация пенообразователей.....	163
7.3.7. Параметры тушения пенами .....	167
7.3.8. Способы тушения пенами жидкостей в резервуарах .....	169
7.3.9. Методы испытания пен и пенообразователей.....	173
7.4. Порошковые огнетушащие составы.....	175
7.4.1. Классификация огнетушащих порошков.....	175
7.4.2. Состав и основные области применения огнетушащих порошков.....	176
7.4.3. Показатели качества огнетушащих порошков и методы их определения ...	179
7.4.4. Механизмы огнетушащего действия порошков.....	182
7.4.5. Особенности применения порошков.....	188
7.5. Аэрозолеобразующие огнетушащие составы.....	194
7.5.1. Состав аэрозолеобразующих композиций.....	194
7.5.2. Устройство генераторов огнетушащего аэрозоля.....	195
7.5.3. Классификация огнетушащих аэрозолей.....	198
7.5.4. Основные механизмы огнетушащего действия аэрозольных огнетушащих составов .....	200
7.5.5. Оценка времени тушения огнетушащим аэрозолем.....	202
Литература .....	207



Учебное издание

БОБКОВ Сергей Анатольевич  
БАБУРИН Александр Владимирович  
КОМРАКОВ Петр Владимирович

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

Учебное пособие

Редактор *А. В. Бондаренко*  
Технический редактор *А. В. Бондаренко*  
Корректор *Н. В. Федькова*

Подписано в печать \_\_\_\_\_ . Формат 60×90 1/16.  
Печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 9,5.  
Бумага офсетная. Тираж 1 000 экз. Заказ

Академия ГПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4