

9-14 ВЫСШАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ШКОЛА МВД СССР

И. М. АБДУРАГИМОВ, В. Ю. ГОВОРОВ,  
В. Е. МАКАРОВ

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

*Допущено Министерством внутренних дел СССР  
в качестве учебного пособия  
для высших учебных заведений МВД СССР*

## РЕЦЕНЗЕНТЫ

Кафедра охраны труда Московского инженерно-строительного института имени В.В.Куйбышева; Главное управление пожарной охраны МВД СССР; начальник отдела ВНИПО МВД СССР кандидат технических наук А.Н.Баратов,

В книге предпринята попытка изложить основные физико-химические закономерности развития и тушения пожара на современных объектах народного хозяйства с учетом специфических особенностей процессов горения в зависимости от вида объекта и агрегатного состояния горючего материала. В учебном пособии особое внимание уделено вопросам доминирующего направления развития пожара и факторам, его определяющим. Более подробно рассмотрены механизмы прекращения процессов горения, лежащие в основе действий по тушению пожара, и кратко основные виды огнетушащих средств, применяемых для целей пожаротушения.

Книга написана в соответствии с программой по дисциплине "Физико-химические основы развития и тушения пожаров" и предназначена в качестве учебного пособия для слушателей Высшей инженерной пожарно-технической школы МВД СССР. Она может оказаться полезной адъюнктам школы, сотрудникам ВНИПО МВД СССР, работникам испытательных пожарных лабораторий и преподавателям пожарно-технических училищ.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс "Физико-химические основы развития и тушения пожаров" является базовой дисциплиной для ряда специальных и профилирующих дисциплин Высшей инженерной пожарно-технической школы МВД СССР: "Пожарная профилактика в технологических процессах производств", "Пожарная профилактика в строительном деле", "Пожарная автоматика", "Пожарная тактика" и др.

В результате изучения этого курса слушатели должны получить определенные представления об основных физико-химических закономерностях развития пожара на современных объектах и об объективных физических и химических процессах, лежащих в основе всех существующих приемов и способов прекращения горения.

В ряде практически важных случаев предлагаемые концепции о механизмах прекращения процессов горения на пожаре доведены до численных расчетов основных параметров процесса тушения: удельных расходов огнетушащих средств, интенсивностей их подачи, требуемого запаса огнетушащих средств на тушение того или иного вида пожара. В данном курсе впервые уделено большое внимание вопросам повышения эффективности методов и средств тушения пожара и даны некоторые рекомендации по количественной оценке качества тушения обычных пожаров.

Изучение курса, помимо лекций, сопровождается выполнением ряда специфических лабораторных работ и упражнений, предназначенных для углубления и развития представлений о сложной совокупности физико-химических процессов и явлений, сопровождающих процесс неорганизованного диффузионного горения в условиях пожара.

В книге использованы отечественные и зарубежные работы в области физики горения, разработки новых видов огнетушащих средств и результатов исследований динамики пожаров и способов борьбы с ними, в частности, экспериментальные работы ВНИИПО МВД СССР и, главным образом, результаты аналитических исследований и натурных испытаний, выполненных ВИПТШ МВД СССР.

Учебное пособие "Физико-химические основы развития и

тушения пожаров" написали: гл.1; 2; 4; § 5.1; 6.1; 6.4; гл.7; § 8.1; 8.2; 9.1; 9.2; 9.4 - доктор технических наук профессор И.М.Абдурагимов; § 5.3; 6.2; 9.5 - кандидат технических наук доцент В.Ю.Говоров; § 5.2; 6.3; 6.5 - кандидат технических наук доцент В.Е.Макаров; гл.3; § 8.4; 9.3 - И.М.Абдурагимов и В.Ю.Говоров; § 8.3; 8.5 - И.М.Абдурагимов и В.Е.Макаров; § 5.4 - инженер Е.В.Крылов.

Авторы выражают глубокую благодарность преподавателям общетехнических и специальных кафедр школы, а также рецензентам кандидату технических наук Баратову А.Н., доктору технических наук Орлову Г.Г., кандидату технических наук Пчелинцеву В.А. за полезные советы и замечания, высказанные в процессе рецензирования рукописи. Так как учебное пособие по этой дисциплине написано впервые, авторы сознают, что книга не свободна от ряда недостатков в изложении некоторых вопросов, все замечания и предложения по улучшению данного учебного пособия будут приняты с благодарностью.

## Глава 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЖАРА КАК ФИЗИЧЕСКОГО ЯВЛЕНИЯ И ЕГО ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НА СОВРЕМЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Изучение физико-химических основ развития и тушения пожаров целесообразно начать с определения самого понятия пожара как физического явления. В ГОСТе 12.1.064-76 сказано: "Пожар — это неконтролируемое горение вне специального очага, наносящее материальный ущерб". Для специалистов пожарной охраны можно дать более развернутое определение: "Пожаром называется процесс горения, возникший произвольно (или по злому умыслу), который будет развиваться и продолжаться до тех пор, пока либо не выгорят все горючие вещества и материалы, либо не возникнут условия, приводящие к самопотуханию (случай весьма редкий, но возможный), либо пока не будут приняты специальные активные меры по его локализации и тушению".

Из этого определения можно сделать три вывода:

1. Горение есть главный и основной процесс на пожаре, так как без горения никакой пожар невозможен. С точки зрения пожарного специалиста горением называется сложный физико-химический процесс превращения горючих веществ и материалов в продукты сгорания, сопровождаемый интенсивным выделением тепла, дыма и световым излучением, в основе которого лежат быстротекущие химические реакции окисления в атмосфере кислорода воздуха.

Особенностями горения на пожаре от других видов горения являются: склонность к самопроизвольному распространению огня до максимальных размеров, сравнительно невысокая степень полноты сгорания, интенсивное выделение дыма, содержащего продукты полного и неполного окисления.

2. Поскольку процесс горения возникает произвольно или по злому умыслу, то никакие предварительные меры не могут полностью исключить вероятность его возникновения.

3. Для уменьшения степени опасности пожара и величины материального ущерба от него, необходимо применять весь накопленный арсенал предварительных конструктивных и профилактических средств и методов по его предотвращению; на случай его возникновения — по его локализации и ограничению интенсивности его развития; а в случае его возникновения принимать активные меры по его локализации и тушению.

Из этих выводов вытекают соответственно три следствия:

- для снижения пожарной опасности любого объекта следует принимать максимум профилактических, конструктивно-технологических, организационных и других мероприятий, направленных на недопущение возникновения пожара;

- на случай, если пожар все-таки возникнет, необходимо предусматривать также конструктивно-планировочные и технологические решения, которые снижали бы интенсивность его развития, способствовали бы локализации зоны горения и задымления;

- необходимо предусматривать комплекс мероприятий, направленных на активную локализацию и тушение пожара специальными технологическими приемами, автоматическими и стационарными системами пожаротушения или путем привлечения сил и средств пожарной охраны в минимально короткое время.

На пожаре одновременно протекает много различных процессов и явлений, одни из которых более или менее просты и понятны, другие - чрезвычайно сложны. Одни из этих явлений постоянны или обязательны на каждом пожаре, т.е. присущи всем пожарам, другие - возникают только на некоторых. Так, для всех пожаров характерны:

горение с выделением в зоне горения тепла и продуктов горения;

массообмен (точнее, газообмен), осуществляемый по механизму конвективных газовых потоков, обеспечивающих приток свежего воздуха (кислорода) в зону горения и отвод продуктов горения из нее ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и др.);

передача тепла из зоны горения в окружающее пространство (в том числе горючим материалам), без которого невозможно непрерывное самопроизвольное продолжение процесса горения на пожаре, его развитие и распространение. Оно приводит к потере механической прочности несущих конструкций и их обрушению, взрыву емкостей высокого давления, сосудов и резервуаров с горючими жидкостями и газами, к выходу из строя приборов и оборудования и т.д. Это тепло осложняет обстановку на пожаре, затрудняет ведение боевых действий по его локализации и тушению.

Эти три основных процесса неразрывно взаимосвязаны и взаимообусловлены. Другие явления встречаются лишь на некоторых видах пожаров. К ним относятся: выделение продуктов неполного сгорания и токсичных продуктов разложения горючих веществ; задымление; деформация или обрушение конструкций; разрыв стенок резервуаров со сжатыми газами; взрыв сосудов

и резервуаров с горючими газами; повреждение коммуникационных систем (электросиловых, связи, водоснабжения и др.); выброс горючих жидкостей и т.п.

Эти "грозные" явления чрезвычайно важны, особенно с точки зрения предупреждения пожаров, тактики тушения и организации боевой работы на пожаре. Они определяют обстановку на пожаре и ее особенности. Некоторые из них, такие как дымобразование, задымление, вскипание и выброс горючих жидкостей и другие, кратко рассмотрены в данном пособии.

Особую опасность с точки зрения динамики развития пожаров представляют взрывы. Взрывы, как правило, возникают внезапно, развиваются с большой скоростью и сопровождаются выделением огромной механической энергии. Они обладают большой разрушительной силой и нередко сопровождаются человеческими жертвами.

Взрыв есть не что иное, как выделение относительно большого количества энергии в конечном (ограниченном) объеме за сравнительно короткий промежуток времени. Под взрывом в данном случае подразумевается процесс интенсивного выделения тепловой энергии горючей смеси при сгорании ее в ограниченном объеме. В этом случае выделившееся тепло недостаточно быстро отводится в окружающее пространство. Оно идет в основном на нагревание и расширение продуктов горения, к резкому повышению давления в замкнутом объеме. Когда давление превышает конструкционную прочность сосуда или резервуара, то приводит к его механическому разрушению.

Взрыв горючей смеси может произойти внутри сосуда, резервуара, реактора, отдельного помещения или здания и не привести к его разрушению, а лишь резко повысить давление и температуру внутри него. Эти случаи, как правило, не представляют собой опасности и лишь приводят к нарушению технологического режима или временному прекращению производственного процесса.

Другие, более специфичные, такие как взрыв, обрушение, обрыв коммуникаций, рассматриваются более подробно в других специальных дисциплинах.

Грандиозные успехи в развитии народного хозяйства нашей страны, влияние научно-технической революции требуют повышения уровня пожарной безопасности объектов народного хозяйства, обеспечения их эффективной и надежной защиты от пожаров и взрывов.

Новые проблемы обеспечения пожарной безопасности возникли и в связи с новыми строительными и архитектурно-планировочными решениями современных объектов. Архитектурно-

планировочные решения и индустриальные методы строительства привели к созданию огромных производственных помещений.

С одной стороны, повысилась огнестойкость зданий. Усовершенствовались и стали более безопасными системы освещения, отопления, вентиляции и др. В городе, где преобладают здания I степени огнестойкости, пожар редко распространяется за пределы одного здания, секции или даже одной-двух квартир.

Но, с другой стороны, огромные производственные цеха площадью в десятки тысяч квадратных метров, высотные здания с лестничными клетками и лифтовыми шахтами, зрелищные залы, павильоны и административные здания на десятки тысяч человек — представляют повышенную пожарную опасность. Особенно остро встают вопросы незадымляемости эвакуационных путей, прогнозирования динамики пожара, направления и интенсивности его развития.

С развитием химической промышленности и технологии производства синтетических полимерных материалов широкое применение для отделки зданий нашли новые конструкционные и декоративно-отделочные материалы. Они легки, технологичны, красивы, высокопрочны, долговечны и экономически более выгодны. Многие из них — это горючие материалы, обладающие токсичными свойствами и большой дымообразующей способностью. Воспламенение таких материалов способствует заполнению помещений продуктами горения и распространения их в эвакуационные пути и смежные помещения. Поэтому в случае возникновения пожаров на таких объектах складывается особо сложная обстановка по динамике развития пожаров, по токсичности продуктов горения, по изысканию средств и методов эффективного прекращения процессов горения.

Для решения этих проблем разрабатываются новые профилактические решения конструктивно-планировочного характера. Внедряются различного рода автоматические, стационарные и привозные системы тушения пожара. Особое внимание уделяется обеспечению безопасности людей на случай пожара или взрыва.

В последние годы значительно повысилась взрывная и пожарная опасность многих видов производств. Резко повысилась мощность энергосиловых установок. Возросли температуры и давление в технологических установках и аппаратах; расход горючих газов, жидкостей, сыпучих и твердых горючих материалов. Все это привело к повышению пожарной опасности производств.



В настоящее время в резервуарных парках хранятся сотни тысяч тонн горючих и легковоспламеняемых жидкостей. На заводах полипропилена, полистирола, синтетических волокон обрабатываются сотни тонн горючих веществ, находящихся в особо пожароопасном состоянии. Многие новые виды синтетических материалов в процессе их производства на крупнотоннажных производствах находятся в состоянии повышенной пожарной опасности. Добыча, хранение и транспортировка горючих жидкостей и газов возросли до небывалых ранее масштабов. Появилось много новых высокопроизводительных, но пожаро- и взрывоопасных методов технологической обработки сыпучих горючих материалов, обрабатываемых в "кипящем слое", когда они находятся во взвешенном состоянии в интенсивных восходящих токах горячего воздуха или смеси газов с воздухом. Возникли новые гиганты промышленности типа автомобильных заводов ВАЗ в Тольятти, КАМАЗ в Набережных Челнах и многие другие промышленные объекты, где площадь цеха под одной крышей измеряется десятками тысяч квадратных метров, объемы помещений - сотни тысяч кубометров, площадь покрытий, выполненных из горючих материалов, - сотни тысяч квадратных метров. Характер развития пожаров на этих объектах будет существенно отличаться от пожаров на обычных промышленных предприятиях. Современный промышленный объект требует новых, более эффективных приемов и способов тушения пожаров. Приемы и способы тушения пожаров на современных пожароопасных объектах значительно усовершенствованы. Одной водой невозможно потушить пожар в резервуаре с ЛВЖ, ГЖ емкостью в десятки тысяч кубометров или на газовом фонтане с большим дебитом газа; без новых огнетушащих средств порошкового типа невозможно успешно потушить пожар, связанный с горением металлоорганических соединений, гидридов бора и алюминия, или сложный пожар на аэродроме, при аварийной посадке самолета и др.

Для эффективного тушения таких пожаров разработаны новые огнетушащие средства: порошковые, пенные, химически активные, комбинированные. Разрабатываются новые приемы и способы их подачи в зону горения: автомобили газоводяного тушения типа АГВТ-100 и АГВТ-150, автомобили порошкового тушения, автомобили пенного тушения. Разработаны объемные и объемно-локальные способы тушения пожара в помещениях; высокоэффективные способы комбинированного тушения особо сложных пожаров; приемы и способы защиты и эвакуации людей из опасных зон пожара и др.

Для прогнозирования динамики развития пожаров на этих объектах, разработки эффективных методов локализации и тушения пожаров необходимо глубоко изучить физико-химические основы их развития и тушения. Тщательно изучив закономерности и взаимосвязь сложных физических явлений и процессов, обуславливающих развитие и тушение таких пожаров, можно разработать научно обоснованные методы эффективной защиты этих объектов и найти новые эффективные средства и способы тушения пожаров на них.

## Глава 2

### ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ НА ПОЖАРЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

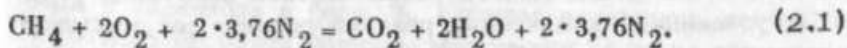
#### § 2.1. Физика и химия процессов горения

Горение является сложным физико-химическим процессом экзотермического превращения исходных компонентов реакционноспособной смеси горючего с окислителем в продукты горения. Выделение тепла происходит непосредственно в зоне химической реакции превращения исходных компонентов горючей смеси в продукты горения. Зона протекающих химических реакций обычно локализована в сравнительно небольшой части пространства. Она может быть неподвижна, а может перемещаться в пространстве в зависимости от условий протекания процесса горения. Горению, как и многим химическим процессам, присущи два этапа: создание молекулярного контакта между молекулами горючего и окислителя (физический) и взаимодействие молекул с образованием продуктов реакции (химический). При этом второй этап наступает только при выполнении некоторых дополнительных условий. Молекулы должны находиться в особом энергетически или химически возбужденном состоянии и в определенном количественном соотношении. Горение является неравновесным процессом. При горении обязательно возникают неоднородности в составе молекул, их концентрации, неравномерности поля температур и скоростей потоков. Этим обусловлена необходимость одновременного решения нестационарных задач массо- и теплопереноса и химической кинетики в движущихся потоках, поэтому в зарубежной научной литературе процессы горения нередко называют еще аэротермохимией. Таким образом, исследования процессов горения сводятся

к решению задач турбулентной массо- и теплопередачи при наличии динамических источников вещества и тепла.

В основе процессов горения лежат химические реакции окисления, т.е. соединения исходных горючих веществ с кислородом. При горении на пожарах в качестве окислителя чаще всего выступает кислород воздуха, окружающий зону протекания химических реакций. В этом случае интенсивность горения определяется не скоростью протекания самих химических реакций, а скоростью поступления кислорода из окружающего пространства в зону горения, т.е. непосредственно в зону протекания химических реакций. Скорость протекания химических реакций горения значительно превосходит скорость таких физических процессов, как диффузия недостающих компонентов в зону реакции и передача тепла из зоны горения горючим веществам для подготовки их к химическому взаимодействию. Эти два процесса - диффузия и теплопередача и являются лимитирующими. Они определяют суммарную скорость горения, а следовательно, и интенсивность процесса тепловыделения и образования продуктов горения. Поэтому считают, что процессы горения на пожаре развиваются в чисто диффузионной области и рассматривать их следует с чисто физической стороны. В уравнениях химических реакций горения учитывают и азот, который содержится в атмосфере, хотя в реакциях горения он практически не участвует.

Состав воздуха условно принимают постоянным, содержащим 21% по объему кислорода и 79% азота (в весовых процентах соответственно 23% кислорода и 77% азота), т.е. на один объем кислорода приходится 3,76 объема азота. Или на один моль кислорода - 3,76 моля азота. Тогда уравнение химической реакции горения метана в воздухе запишется так:



Азот в уравнениях химических реакций горения учитывать необходимо потому, что он поглощает часть тепла, выделяемого в результате реакций горения и входит в состав продуктов горения - дымовых газов.

Из физики горения известно, что существуют так называемые концентрационные пределы воспламенения горючих смесей (не вытекающие непосредственно из уравнений химических реакций горения, а определяемые законами химической кинетики и энергетическими условиями процессов горения). Концентрационные пределы воспламенения некоторых горючих газов приведены в приложении табл. I.

Смеси с малым содержанием горючего газа условно называются "бедными", а предел - нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ); смеси с большим содержанием горючего газа называются "богатыми", а предел - верхним концентрационным пределом воспламенения (ВКПВ). Вне этих пределов смеси горючего с окислителем считаются неакционноспособными, т.е. негорючими. Иногда, при диффузионном горении, предельные условия горючести веществ и материалов задаются не по соотношению горючего и окислителя, т.е. не по концентрационному составу смеси, а по парциальному давлению кислорода в окружающей атмосфере или по концентрации кислорода в ней. Для неодинаковых горючих веществ предельные концентрации кислорода будут различны. Они зависят от вида горючего, его строения и количества связанного кислорода в молекуле. Чем больше кислорода входит в состав молекулы горючего, тем ниже концентрационный предел воспламенения по кислороду. Так, например, пороха и некоторые синтетические материалы могут гореть вообще без доступа воздуха или в нейтральной среде (в чистом азоте). Но для большинства углеводородных горючих веществ, встречающихся на пожаре, диффузионное горение невозможно при снижении концентрации кислорода ниже 14-15%\*.

Наиболее реакционноспособной является стехиометрическая смесь горючего с окислителем. Стехиометрической называется смесь, в которой количественное соотношение горючего и окислителя соответствует уравнению химической реакции горения. При горении такой смеси выделяется наибольшее количество тепла, скорость горения близка к максимальной, а состав продуктов горения близок к равновесному. В этом случае в составе продуктов горения почти не образуется продуктов неполного окисления и содержится эквивалентное количество азота.

По уравнениям химических реакций горения рассчитывают количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы или единицы объема горючего вещества, а также состав и количество продуктов горения.

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы (кг) или объема ( $m^3$ ) горючего ве-

\* Иначе горят вещества, обладающие широкой областью воспламенения, типа водорода, ацетилена и др.; металлы типа калия, натрия и др.; гидриды металлов и металлорганических соединений и тлеющие материалы типа хлопка, склонные к гетерогенному горению по механизму тления.

щества, называется теоретически необходимым и обозначается  $V_B^0$ .

Расход воздуха на горение индивидуальных химических соединений определяется по формуле:

при горении 1 кг жидких и твердых веществ

$$V_B^0 = \frac{106,6 \nu}{z M}, \quad (2.2)$$

при горении 1 м<sup>3</sup> паров или газов

$$V_B^0 = \frac{4,76 \nu}{z}, \quad (2.3)$$

где  $\nu$  - число молей кислорода;  $z$  - число молей горючего вещества;  $M$  - молекулярная масса горючего вещества, кг/моль.

Расход воздуха на горение веществ, представляющих смесь химических соединений (древесина, торф, нефть, природный газ и др.), определяется по формулам:

при горении 1 кг жидких и твердых веществ

$$V_B^0 = 0,269 \left( \frac{C}{3} + H + \frac{S}{8} - \frac{O}{8} \right), \quad (2.4)$$

при горении 1 м<sup>3</sup> газа

$$V_B^0 = \frac{2CH_4 + 0,5H_2 + 0,5CO + 1,5H_2S - O_2}{21}, \quad (2.5)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $S$ ,  $O$  - содержание углерода, водорода, серы и кислорода в горючем веществе, %;  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$ ,  $O_2$  - содержание метана, водорода, окиси углерода, сероводорода и кислорода в газе, %. Количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы массы или единицы объема некоторых горючих веществ, приведено в приложении табл. II.

Состав и объем продуктов горения (приведенного к нормальным условиям) некоторых горючих веществ и материалов приведены в приложении табл. III.

При горении индивидуальных химических соединений объем продуктов горения  $V_{\Gamma}^0$  определяется из уравнения реакции горения по формулам:

при горении 1 кг жидкого или твердого вещества

$$V_{\Gamma}^0 = \frac{(m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2}) 22,4}{z M}, \quad (2.6)$$

при горении 1 м<sup>3</sup> газа

$$V_{\Gamma}^0 = \frac{m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2}}{z}, \quad (2.7)$$

где  $V_{\Gamma}^0$  - объем влажных продуктов горения при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кг; м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{CO}_2}$ ,  $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $m_{\text{N}_2}$  - число молей двуокси углерода, паров воды и азота в уравнении реакции горения;  $z$  - число молей горючего вещества в уравнении реакции горения.

При горении веществ, представляющих смесь химических соединений (древесина, торф, нефть и др.) при известном элементном составе их, объем продуктов горения определяется по формуле

$$V_{\Gamma}^0 = 8,86C' + 32,2H' + 3,3S' + 0,8N' + 1,24W' - 2,625O', \quad (2.8)$$

где  $C'$ ,  $H'$ ,  $S'$ ,  $N'$ ,  $W'$ ,  $O'$  - массы углерода, водорода, серы, азота, влаги и кислорода в горючем веществе, кг.

При горении смеси газов объем продуктов горения определяется по формуле

$$V_{\Gamma}^0 = 2,88H_2 + 2,88CO + 7,64H_2S + 10,52CH_4 + 12,4C_2H_2 + \\ + 15,28C_2H_4 + CO_2 + N_2, \quad (2.9)$$

где  $H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  - объемы компонентов в 1 м<sup>3</sup> смеси газов, м<sup>3</sup>.

Из физики горения и взрыва известно, что при полном сгорании единицы массы какого-либо горючего вещества выделяется определенное количество тепла. Количество тепла, выделяемое при сгорании единицы массы или единицы объема горючего вещества, называется удельной теплотой сгорания.

Низшей теплотой горения по рабочей массе горючего вещества  $Q^P$  называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании вещества и условия, что влага, содержащаяся в продуктах горения, находится в парообразном состоянии. Для индивидуальных веществ  $Q^P$  - величина постоянная и находится по справочникам, а для сложных многокомпонентных горючих веществ и материалов зависит от их состава и может быть рассчитана по формуле Д.И. Менделеева

$$Q_H = 339,4C + 1257H - 108,9(O-S) - 25,1(9H-W), \quad (2.10)$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $S$  и  $W$  — процентное содержание этих компонентов в горючем веществе.

Низшая теплота горения смеси газов, в расчете на  $1 \text{ м}^3$  горючей смеси, определяется по формуле вида:

$$Q_{\text{н}} = 126,5CO + 107,7H_2 + 358,2CH_4 + 590,8C_2H_4 + \quad (2.11) \\ + 636,9C_2H_6 + 913,4C_3H_8 + 1185,8C_4H_{10} + \\ + 1462,3C_5H_{12} + 234,6H_2S,$$

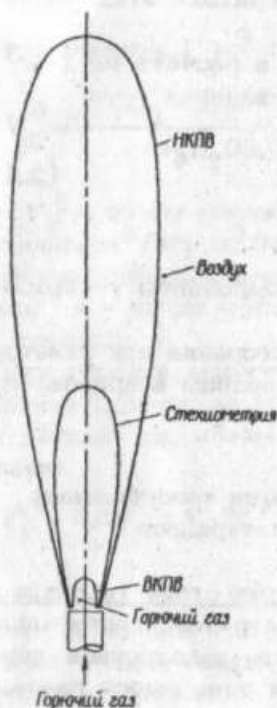
где учтены наиболее распространенные компоненты углеводородных горючих газовых смесей.

Численные значения низшей теплоты сгорания для некоторых видов горючих веществ и материалов приведены в приложении табл. IV.

## § 2.2. Структура диффузионных пламен газообразных, жидких и твердых горючих материалов

Механизм смесеобразования затопленных струй (понятие затопленной струи). При втекании осесимметричной вертикальной газовой струи снизу вверх в пространство, заполненное другим газом, вокруг ядра струи образуется зона смеси газов. Вовлекая в движение окружающий покоящийся газ, втекающая струя разбавляется им. Если втекает горючий газ в воздушную атмосферу, то на некотором расстоянии от устья трубы образуется пограничный слой смеси газов переменного состава. На "бесконечном удалении" чистый воздух; в ядре — "чистый" горючий газ, а в промежуточной зоне смесь газов, лежащая в пределах горючести от "бедной" на внешней границе струи до "богатой" на внутренней. В промежутке между концентрационными пределами воспламенения газовой смеси лежит осесимметричная "поверхность" состава, близкого к стехиометрическому (рис.2.1). Если к такой струе поднести источник зажигания, газовая струя вспыхнет и установится стационарный факел пламени. Поскольку максимальная скорость лежит в области концентраций, близких к стехиометрическим, то автоматически факел пламени "установится" именно на этой осесимметричной "поверхности". Возникшие конвективные газовые потоки горячих продуктов сгорания образуют вокруг факела пламени интенсивный приток свежего воздуха к нему, а оттекающие вверх горячие продукты горения несколько деформируют (расширяют) внешнюю (верхнюю) часть факела. Снизу и с боков факел пламени будет поджиматься восходящими хо-

Рис.2.1. Структура диффузионного пламени горючего газа



лодными потоками окружающего газа, а вверху – слегка расширяться за счет горячих продуктов горения, имеющих больший удельный объем. Такова структура диффузионного газового факела. Скорость и полнота сгорания, теплонпряженность факела, его температура и размеры зависят, главным образом, от вида горючего и газодинамического режима его истечения (давления истечения, диаметра и формы сопла и т.д.). Ориентировочно максимальная температура факела диффузионного пламени для большинства углеводородных горючих газов равна 1350–1500°С.

Структура диффузионного факела пламени над поверхностью горючей жидкости, механизм и скорость его распространения. Структура диффузионного факела пламени над зеркалом

горючей жидкости примерно такая же. Разница только в том, что поступающие с поверхности жидкости горючие пары не имеют такого начального запаса кинетической энергии, как струя газа, и до воспламенения смешиваются с окружающей газовой средой не за счет кинетической энергии втекающего газового потока, а более медленно по механизму конвективной и молекулярной диффузии. Но если к образовавшейся паровоздушной смеси поднести источник зажигания, то возникнет факел пламени, который изменит соотношение газовых и тепловых потоков над зеркалом жидкости: горячие продукты сгорания, как более легкие, устремятся вверх, а на их место из окружающего пространства поступит свежий "холодный" воздух, который приведет к разбавлению паров горючей жидкости. От факела пламени к зеркалу жидкости поступит лучистый поток тепловой энергии, который пойдет на нагревание поверхностных слоев жидкости и по мере их разогрева интенсифицирует процесс ее испарения.

Если жидкость до воспламенения имела температуру, значительно превышающую температуру воспламенения, то горение



паров жидкости над резервуаром или пролитой жидкостью интенсифицируется, прогрессирует, размер факела пламени будет расти. Соответственно увеличивается интенсивность лучистого теплового потока к поверхности жидкости (рис.2.2), интенсифицируется процесс испарения, возрастает интенсивность конвективного газового потока вокруг факела пламени, оно будет все сильнее поджиматься с боков, принимая форму конуса, увеличивающегося в размере (рис.2.3). При дальнейшем горении пламя переходит в турбулентный режим горения и будет расти до тех пор, пока не установится режим теплового и газодинамического равновесия. Максимальная температура турбулентного диффузионного пламени большинства ЛВЖ, ГЖ не превышает 1250-1350°C.

Распространение горения по поверхности зеркала жидкости зависит от скорости образования горючей смеси по механизму молекулярной и конвективной диффузии. Поэтому для жидкостей с температурой ниже температуры воспламенения эта скорость менее 0,05 м/с, а для жидкостей выше температуры воспламенения достигает 0,5 м/с и более.

Таким образом, скорость распространения пламени по поверхности горючей жидкости зависит в основном от ее температуры.

Структура диффузионного факела пламени над поверхностью твердых горючих материалов, механизм и скорость его распространения. Структура диффузионного факела пламени при горении твердых горючих материалов примерно такая же, как при горении газов и жидкостей. Есть лишь небольшая качественная и количественная разница. У твердых горючих материалов, как правило, выше начальная температура, при которой начинается выделение летучих фракций. Например, для древесины она составляет 150-200°C. Начальный температурный источник для воспламенения твердых горючих материалов зависит от геометрических размеров материала. Для компактных, крупноразмерных образцов при малой начальной температуре необходим более мощный и более продолжительный источник зажигания, чем для ЛВЖ, ГЖ. Для воспламенения тонкодисперсных, листовых, порошкообразных твердых горючих веществ и материалов требуется небольшой температурный источник, меньше, чем для некоторых ГЖ, находящихся при низких температурах (ниже температуры воспламенения). Максимальная температура диффузионного пламени большинства видов твердых горючих материалов органического происхождения достигает 1200-1250°C.



Рис.2.2. Структура диффузионного пламени горючей жидкости

После нагревания твердого горючего материала выше 250–300°C над его поверхностью образуется смесь горючих газов с воздухом, лежащая внутри концентрационных пределов воспламенения. Она воспламеняется и весь процесс повторяется, как при горении паров горючей жидкости (рис.2.4). Отличие состоит в том, что под слоем угля и в нем самом после протекания первых стадий горения возникают дополнительные экзотермические процессы:

догорание угольного остатка и различные пиролитические процессы (деструкция и неполное окисление продуктов пиролиза). Эти процессы еще больше разогревают твердое горючее и интенсифицируют выход газообразных летучих фракций в зону горения. Скорость горизонтального распространения пламени по твердым веществам и материалам ниже, чем горючим жидкостям. Она измеряется несколькими сантиметрами в секунду и менее и зависит от температуры, геометрических размеров и пространственной ориентации горячей поверхности. На рис.2.5 показана зависимость скорости распространения пламени по поверхности древесины от ее начальной температуры в диапазоне температур 100–200°C. Скорость распространения пламени в этом интервале температур описывается эмпирической зависимостью вида:

$$v_p = \frac{A_{др}}{t_B - t_i}, \quad (2.12)$$

где  $A_{др} = 7 \text{ (см} \cdot \text{°C) / с}$ ;

$t_B^{др}$  — температура максимальной скорости распространения пламени (выше температуры начала пиролиза ТГМ). Численное значение  $v_p$  сильно возрастает с ростом температуры ТГМ, выше определенных значений. При горении твердых горючих материалов в отличие от ЛВЖ, ГЖ они могут быть по-разному расположены в пространстве и горячая поверхность может занимать горизонтальное, наклонное и вертикальное положения. Когда горение распространяется вверх, по направлению конвективных газовых потоков, то теплопередача осуществляется не

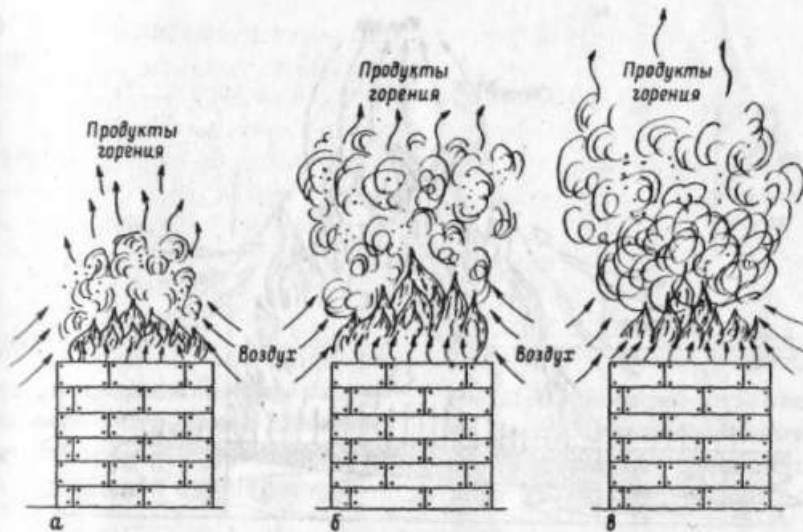


Рис.2.3. Изменение формы и размеров зоны горения при горении жидкости в резервуаре: а – начало горения; б – развитие процесса горения; в – установившийся режим горения

только лучистым теплообменом, но и конвекцией. Пламя и продукты горения в этом случае непосредственно омывают поверхность горения. Скорость нагрева поверхности горения и скорость распространения пламени резко возрастают. Они увеличиваются в 5–10 раз и более. На рис 2.6 показана зависимость скорости распространения пламени по образцам из древесины от угла их наклона. Из графика видно, что если скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности принять за единицу ( $\alpha = 90^\circ$ ), то по вертикальной поверхности вниз ( $\alpha = 180^\circ$ ) она будет вдвое меньше, а вверх ( $\alpha = 0^\circ$ ) в 8–10 раз больше.

Скорость распространения пламени по поверхности твердых горючих веществ и материалов зависит от толщины образца (рис.2.7) и описывается эмпирической зависимостью вида:

$$v_{л} = v_p^0 + \frac{B}{\delta}; \quad (2.13)$$

где  $B$  – экспериментальная величина;  $\delta$  – толщина материала.

Скорость распространения пламени зависит также и от на-

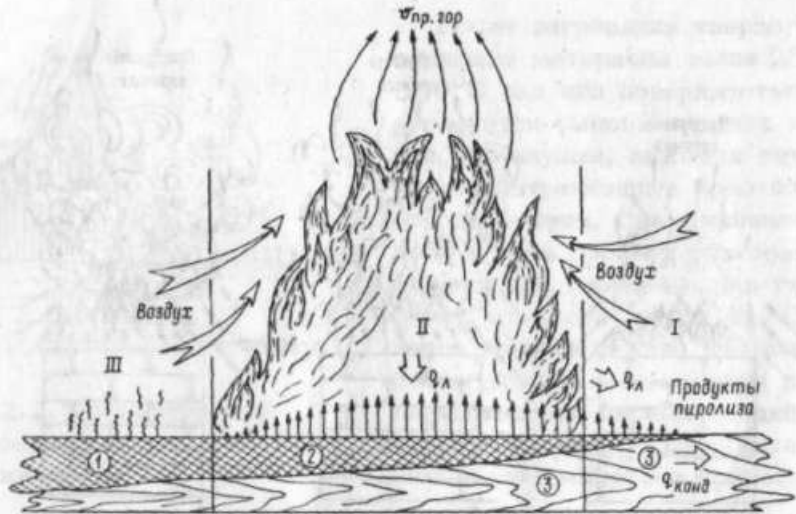


Рис.2.4. Структура диффузионного пламени над горизонтальной поверхностью твердого горючего материала: I - зона подготовки поверхности ТГМ к воспламенению; II - зона пламенного гомогенного горения; III - зона беспламенного гетерогенного горения (тление); 1 - переугленный остаток; 2 - углистый слой и частично пиролизованная древесина; 3 - "свежая", непиролизованная древесина

правления и скорости внешних газовых потоков (рис.2.8). Из рисунка видно, что встречный поток воздуха в 2-3 раза снижает скорость распространения пламени по поверхности твердого горючего материала, а попутный - соответственно в 2-3 раза увеличивает ее.

При больших скоростях газовых потоков, при встречном направлении произойдет "останов" фронта распространения или срыв пламени, а при попутном - его ускорение или срыв.

В реальных условиях горения на пожаре на скорость распространения пламени по поверхности твердых горючих материалов могут влиять сразу несколько факторов. Тогда скорость распространения пламени будет увеличиваться под действием каждого из них, возрастая в десятки и сотни раз.

Для некоторых объектов и материалов скорость распространения горения на пожаре (ориентировочно) приведена в приложении табл. V, VI.

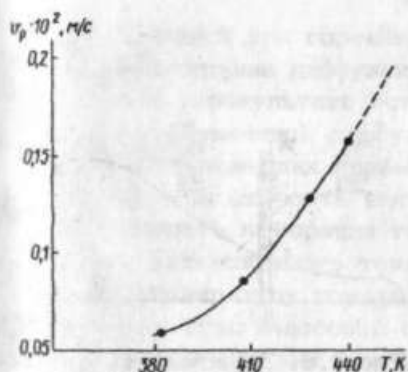


Рис.2.5. Зависимость скорости распространения пламени по поверхности древесины от ее начальной температуры

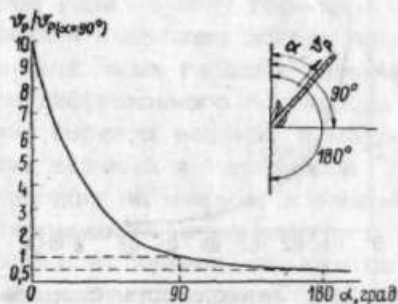


Рис.2.6. Зависимость скорости распространения пламени по образцам из древесины от угла их наклона

### § 2.3. Особенности механизма горения газообразных, жидких и твердых горючих веществ и материалов на пожаре

Различают гомогенное и гетерогенное горение. Гомогенное горение встречается на пожаре чаще. При гомогенном горении оба реагента (горючее и окислитель) находятся в газовой (паровой) фазе. Гомогенное горение происходит не только когда горят горючий газ или пары горючих жидкостей, но и при горении большинства твердых горючих материалов.

Гетерогенное горение происходит тогда, когда горючее находится в твердом состоянии, а окислитель – в газообразном, и реакция окисления горючего осуществляется в твердой фазе. Молекулы горючего до начала окисления не покидают твердой фазы, а легкоподвижные молекулы газообразного окислителя поступают к молекулам горючего и вступают с ними в экзотермическую реакцию горения, образуя окисел. Образовавшийся же продукт неполного окисления (CO) или продукт горения (CO<sub>2</sub>), будучи газообразным, не остается "связанным" в пределах твердой фазы, а, покидая ее, выходит за ее пределы, в первом случае, – доокисляясь в газовой фазе до CO<sub>2</sub>, а во втором – удаляется с отходящими газами. Так, например, горит углерод в слое угля.

Существуют вещества, которые проходят через три агрегатных состояния: твердое горючее вещество плавится, расплавленное горючее вещество испаряется и горит в паровой фазе (например, парафин, стеарин, некоторые виды каучуков).

Все горючие жидкости перед воспламенением испаряются, а

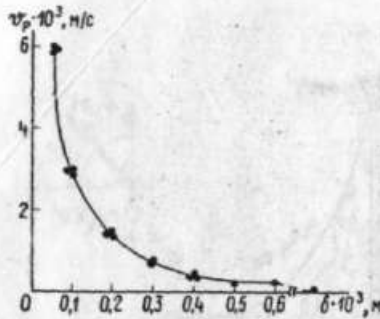


Рис.2.7. Зависимость скорости распространения пламени от толщины образца

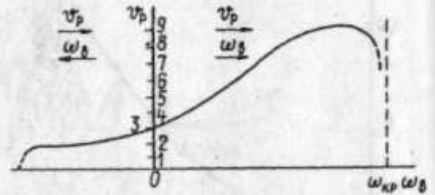


Рис.2.8. Зависимость скорости распространения пламени от скорости и направления газовых потоков

смесь паров с кислородом воздуха вступает в окислительную реакцию горения, образуя продукты горения и выделяя при этом энергию в виде тепловой и световой (лучистой). За счет связанного кислорода или кислорода, растворенного в жидкости, окислительные процессы могут идти и в жидкой фазе, особенно на ее поверхности. Эти окислительные реакции при высоких температурах могут ускоряться, но они, как правило, не относятся к реакциям горения, и поэтому не рассматриваются при изучении механизма горения на пожаре.

То же самое происходит и при горении твердых веществ и материалов. Их воспламенению предшествует возгонка, т.е. выделение легколетучих газовых фракций из структуры твердого тела (древесины, углей, сланцев и многих натуральных и синтетических твердых горючих материалов).

При нагревании может наступить термическое разложение — пиролиз горючего материала (его "твердой" основы), при этом выделяющиеся продукты переходят в паровую или газовую фазу и смешиваются с кислородом воздуха. Затем вступают в химическое взаимодействие с выделением тепла, света и образованием продуктов полного окисления. При этом в твердой фазе могут протекать экзотермические реакции распада или частичного окисления, которые, начавшись под воздействием внешнего теплового источника, сами впоследствии приводят к дальнейшему разогреву горючего материала, интенсификации пиролиза, интенсификации газофазного процесса горения. Но, как правило, при исследовании механизмов горения на пожаре эти процессы также не рассматриваются как реакции горения.

Под диффузией при горении на пожарах понимается в основном конвективная диффузия молей газа в зону горения, возникающая в результате естественной конвекции вокруг зоны горения и турбулентной диффузии интенсивных газовых потоков.

Одним из важнейших параметров диффузионного горения на пожаре является скорость выгорания горючих веществ и материалов. Скорость выгорания горючих веществ и материалов определяет интенсивность тепловыделения на пожаре, а следовательно, температуру пожара, интенсивность его развития и другие параметры. Массовой скоростью выгорания называется масса вещества или материала, выгорающая в единицу времени,  $v_M$ , [ кг/с ]. Массовая скорость выгорания так же, как и скорость распространения горения, зависит от агрегатного состояния горючего вещества или материала. Скорость выгорания горючего газа зависит от его расхода. Горючие газы хорошо перемешиваются с окружающим воздухом за счет кинетической энергии их истечения, и поэтому почти полностью сгорают в факеле пламени. Массовая скорость выгорания горючих жидкостей определяется скоростью их испарения, поступления паров в зону горения и условиями их смешения с кислородом воздуха. Скорость испарения при равновесном состоянии системы "жидкость-пар" зависит от физико-химических свойств жидкости, ее температуры и упругости пара. При неравновесном состоянии интенсивность испарения жидкости определяется температурой ее поверхностного слоя. Температура, в свою очередь, зависит от интенсивности тепловых потоков от зоны горения, теплоты испарения и условий теплообмена с нижними слоями жидкости.

Для сложных, многокомпонентных горючих жидкостей состав их паровой фазы определяется концентрационным составом раствора и зависит от интенсивности испарения и степени их равновесности. При интенсивном испарении в поверхностных слоях жидкости происходит процесс разгонки и состав паровой фазы отличается от равновесного, а массовая скорость выгорания изменяется по мере выгорания более легколетучих фракций. Наконец, процесс выгорания зависит от интенсивности смесеобразования паров жидкости с кислородом воздуха. Смесеобразование, в свою очередь, зависит от размеров сосуда, резервуара, от высоты борта над уровнем жидкости (длины пути смешения до зоны горения) и интенсивности внешних газовых потоков. Чем больше диаметр резервуара, тем хуже условия смесеобразования (больше путь взаимной диффузии паров горючего и воздуха). С увеличением высоты свободного

борта (больше длина пути паров жидкости до зоны горения) скорость выгорания жидкости уменьшается. Чем больше скорость ветра, тем интенсивнее процесс смесеобразования и выше скорость выгорания жидкости.

Таким образом, чем выше начальная температура горючей жидкости, тем больше массовая скорость его выгорания. Затем с повышением температуры поверхностного слоя жидкости до температуры, близкой к температуре кипения, массовая скорость выгорания стабилизируется (если не происходит разгонки жидкости и существенного снижения ее уровня в резервуаре).

Массовая скорость выгорания жидкости увеличивается до диаметра 2-2,5 м, а далее с увеличением диаметра практически остается постоянной. Наибольшая скорость выгорания наблюдается при верхнем уровне жидкости в резервуаре.

Масса жидкости, выгорающей в единицу времени с единицы площади поверхности, называется удельной массовой скоростью выгорания  $v_M$  [кг/(м<sup>2</sup>·с)].

Объемной скоростью выгорания называется объем материала, выгорающий в единицу времени с единицы площади поверхности горения  $v_0$ . Для газов это объем газа, сгорающий в единицу времени  $v_0$  [м<sup>3</sup>/с], а для жидкостей и твердых горючих веществ и материалов это удельная объемная скорость выгорания  $v_0$  [м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с)]. Она может быть выражена и через м/с, т.е. иметь размерность линейной скорости. Физически она выражает скорость понижения уровня жидкости по мере ее выгорания или скорость выгорания толщины слоя твердого горючего материала. Поэтому ее еще называют линейной скоростью горения. Перевод объемной или линейной скорости выгорания в массовую осуществляется по формуле

$$v_M = \frac{v_0 \rho}{1000}$$

В приложении табл. VII приведены усредненные значения массовой и линейной скоростей выгорания некоторых горючих жидкостей при верхнем уровне их в резервуаре и отсутствии ветра, полученные экспериментально.

Скорость выгорания жидкостей, разлитых на поверхности, зависит от толщины их слоя. Если толщина слоя жидкости более 10 мм, то скорость ее выгорания почти не отличается от приведенной в приложении табл. VII. Для более тонких слоев жидкости и пленок скорость выгорания значительно выше.

Массовая скорость выгорания твердых горючих веществ и



материалов зависит от вида горючего, его состояния (размеров, величины свободной поверхности, положения по отношению к зоне горения и др.), температуры пожара и интенсивности газообмена.

В приложении табл. VIII приведены удельные массовые скорости выгорания некоторых твердых горючих материалов при различной температуре, но постоянных влажности и газообмене.

Экспериментально установлено, что древесина при температуре  $900^{\circ}\text{C}$  имеет удельную массовую скорость выгорания  $0,011-0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ . Скорость выгорания твердых горючих материалов вообще не превышает  $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  и редко бывает ниже  $0,005 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ . Твердые горючие материалы могут иметь сильно развитую свободную поверхность, тогда приведенная массовая скорость выгорания их значительно выше удельной.

Приведенная массовая скорость выгорания (табл.2.1) получена при относительной площади проемов  $0,16$  (отношение площади проемов, через которые осуществляется газообмен к площади пожара,  $F_{\text{пр}} / F_{\text{п}}$ ). В табл.2.1 приведена массовая скорость выгорания древесины в зависимости от площади проема.

Таблица 2.1

Приведенная массовая скорость выгорания древесины, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$	Относительная площадь проема $F_{\text{пр}} / F_{\text{п}}$
0,0134	0,25
0,0125	0,2
0,0108	0,16
0,009	0,1

Из табл.2.1 видно, что при уменьшении площади проемов скорость выгорания снижается.

При различных условиях газообмена скорость выгорания твердых горючих материалов принимают пропорциональной площади проемов:

$$v_{\text{м.д}}' = \varphi v_{\text{м.т}}'$$

где  $v_{\text{м.т}}'$  и  $v_{\text{м.д}}'$  - соответственно табличная (табл. VIII приложения) и действительная массовые скорости выгорания;

$\varphi = \frac{F_{\text{пр}}}{0,16F_{\text{п}}}$  - коэффициент, учитывающий условия газообмена.

Данное выражение справедливо при значении коэффициента  $\varphi$  от 0,25 до 0,085. Для открытых пожаров коэффициент  $\varphi$  принимают равным единице.

## Глава 3

### ПАРАМЕТРЫ И ЗОНЫ ПОЖАРА

#### § 3.1. Параметры пожара

Из практики известно, что главное и основное явление на всех пожарах - это горение, но сами пожары всегда различны, индивидуальны. Во-первых, разнообразны виды и режимы процесса горения (горение кинематическое и диффузионное, гомогенное и гетерогенное, ламинарное и турбулентное, дифлаграционное и детонационное, полное и неполное и т.д.); во-вторых, разнообразны условия, в которых происходит горение (состояние и расположение горючего вещества, тепло- и массообмен в зоне горения и др.). Поэтому каждый пожар необходимо регистрировать, описывать, исследовать, сравнивать с другими, близкими по характеру, т.е. изучать параметры пожара.

Продолжительность пожара -  $t_{\text{п}}$  [мин]. Продолжительностью пожара называется время с момента его возникновения до полного прекращения горения.

Площадь пожара -  $F_{\text{п}}$  [м<sup>2</sup>]. Площадью пожара называется площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На рис.3.1 показаны характерные случаи определения площади пожара. На внутренних пожарах в многоэтажных зданиях общая площадь пожара находится как сумма площадей пожара всех этажей. В большинстве случаев пользуются проекцией зоны горения на горизонтальную плоскость, сравнительно редко - на вертикальную, например, при пожаре на газовом фонтане, при горении одиночной конструкции небольшой толщины, расположенной вертикально, например, перегородки, декорации и т.п. Площадь пожара является одним из основных параметров пожара, особенно важным при оценке его размеров, при выборе метода тушения, при определении особенностей тактики его тушения и расчете количества сил и средств, необходимых для его локализации и ликвидации.

Температура пожара -  $T_{\text{п}}$  [K];  $t_{\text{п}}$  [°C]. Под температу-

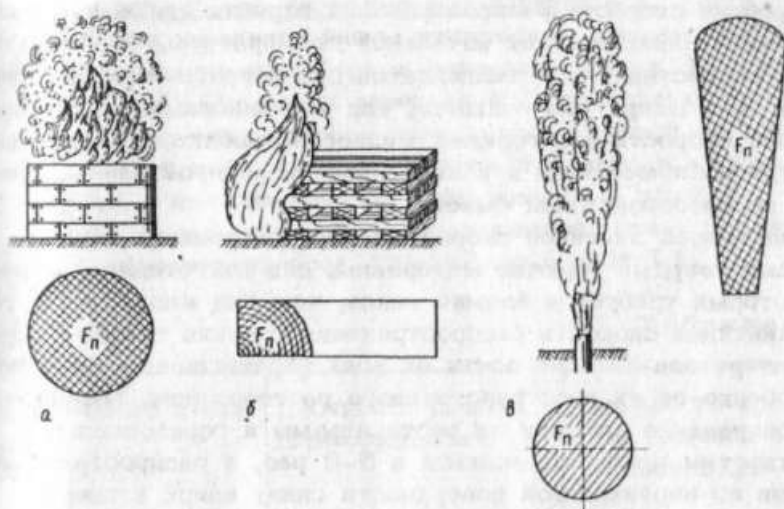


Рис.3.1. Площадь пожара: а – при горении жидкости в резервуаре; б – при горении штабеля пиломатериалов; в – при горении газонефтяного фонтана

рой внутреннего пожара понимают среднеобъемную температуру газовой среды в помещении, а под температурой открытого пожара – температуру пламени. Температура внутренних пожаров, как правило, ниже, чем открытых.

Линейная скорость распространения пожара –  $v_p$  [м/с].

Под этим параметром понимают скорость распространения горения по поверхности горючего материала в единицу времени. Линейная скорость распространения горения определяет площадь пожара. Она зависит от вида и природы горючих веществ и материалов, от способности к воспламенению и начальной температуры, от интенсивности газообмена на пожаре и направленности конвективных газовых потоков, от степени измельченности горючих материалов, их пространственного расположения и других факторов.

Линейная скорость распространения горения непостоянна во времени, поэтому в практических расчетах пользуются средними значениями.  $v_p'$  которые являются величинами весьма приближенными.

Наибольшей  $v_p$  обладают газы, поскольку в смеси с воздухом они уже подготовлены к горению и для его продолжения, если горение возникло, затрачивается тепло на нагрев смеси только до температуры воспламенения.

Линейная скорость распространения горения для жидкостей в основном зависит от их начальной температуры. Особенно резкое возрастание  $v_p$  наблюдается при нагреве горючих жидкостей до температуры вспышки, так как наибольшее значение линейной скорости для горючих жидкостей наблюдается при температуре воспламенения и равно скорости распространения горения по паровоздушным смесям.

Наименьшей линейной скоростью распространения горения обладают твердые горючие материалы, для подготовки к горению которых требуется больше тепла, чем для жидкостей и газов. Линейная скорость распространения горения твердых горючих материалов зависит почти от всех перечисленных факторов, но особенно от их пространственного расположения. Например, распространение пламени по вертикальным и горизонтальным поверхностям может отличаться в 5-6 раз, а распространение пламени по вертикальной поверхности снизу вверх и сверху вниз приблизительно в 10 раз. Линейная скорость распространения горения по горизонтальной поверхности наиболее часто используется в расчетах.

Скорость выгорания горючих веществ и материалов (см. § 2.3).

Интенсивность газообмена -  $I_g$  [кг/(м<sup>2</sup>·с)]. Интенсивностью газообмена называется количество воздуха, притекающее в единицу времени к единице площади пожара. Различают требуемую интенсивность газообмена -  $I_g^{TR}$ , фактическую -  $I_g^F$ . Требуемая интенсивность газообмена показывает, какое количество воздуха должно притекать в единицу времени к единице площади пожара для обеспечения полного сгорания материала. Поскольку полное горение в условиях пожара практически никогда не достигается, то  $I_g^{TR}$  характеризует удельный расход воздуха, при котором возможна максимальная плотота сгорания горючего материала. Фактическая интенсивность газообмена характеризует фактический приток воздуха на пожаре, а следовательно, полноту сгорания, плотность задымления, интенсивность развития и распространения пожара и другие параметры. Интенсивность газообмена относится к внутренним пожарам, где ограждающие конструкции ограничивают приток воздуха в объем помещения (а следовательно, и в зону горения), но проемы в ограждающих конструкциях позволяют определить количество воздуха, поступающего в объем помещения. На открытых пожарах воздух поступает из окружающего пространства непосредственно в зону горения и расход его остается неизвестным.

Интенсивность или плотность задымления -  $z$ . Эти параметры пожара характеризуются ухудшением видимости и степенью токсичности атмосферы в зоне задымления. Ухудшение видимости при задымлении определяется плотностью, которая оценивается по толщине слоя дыма, через который не виден свет эталонной лампы, или по количеству твердых частиц, содержащихся в единице объема, и измеряется в  $г/м^3$ .

Данные о плотности дыма, образующегося при горении веществ, содержащих углерод, приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Наименование дыма	Плотность дыма, г.твер.фазы/ $м^3$	Видимость предметов, освещаемых лампой в 21 свечу, м
Дым плотный	Более 1,5	До 3
Дым средней плотности	От 0,6 до 1,5	От 3 до 6
Дым слабой плотности	От 0,1 до 0,6	От 6 до 12

Теплота пожара -  $Q_{п}$  [кДж/с]. Теплота пожара характеризует, какое количество тепла выделяется в зоне горения в единицу времени. Приведенная теплота пожара  $Q'_{п}$  [кДж/( $м^2 \cdot с$ )] показывает, какое количество тепла выделяется в единицу времени с единицы площади пожара:

$$Q_{п} = \beta v'_M F_{п} Q_{п}^P, \quad (3.1)$$

где  $\beta$  - коэффициент химического недожога;  $v'_M$  - приведенная массовая скорость выгорания,  $кг/(м^2 \cdot с)$ ;  $F_{п}$  - площадь пожара,  $м^2$ ;  $Q_{п}^P$  - теплота сгорания,  $кДж/кг$ .

Приведенная теплота пожара определяется по формуле

$$Q'_{п} = \beta v'_M Q_{п}^P. \quad (3.2)$$

Коэффициент химического недожога для веществ и материалов выбирается в зависимости от количества воздуха, необходимого для полного сгорания единицы массы горючего:

при	$v_B^0$	$\beta$
> 10	м <sup>3</sup> /кг	0,8±0,9
~ 5	м <sup>3</sup> /кг	0,9±0,95
< 5	м <sup>3</sup> /кг	0,95±0,99

Размер пожара определяется объемом зоны горения. Энергетическая мощность зоны горения характеризуется теплонапряженностью  $Q_{II}^{об}$  [кДж/(м<sup>3</sup>·с)], которая показывает, какое количество тепла выделяется в единицу времени в единице объема зоны горения.

Кроме перечисленных параметров пожара, существуют еще и такие, как: периметр пожара, фронт распространения горения, высота пламени, интенсивность излучения пламени и др.

Следует иметь в виду, что все параметры пожара изменяются во времени и взаимосвязаны друг с другом. Например, продолжительность пожара зависит не только от величины пожарной нагрузки, но и от скорости ее выгорания. Последняя, в свою очередь, зависит от вида и температуры пожара, а температура от интенсивности газообмена и тепловыделения. Основным фактором, определяющим параметры пожара, является вид и величина пожарной нагрузки. Под пожарной нагрузкой объекта понимают массу всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м<sup>2</sup> площади пола помещения или площади, занимаемой этими материалами на открытой площадке:

$$P_{г.п} = \frac{P}{F}, \quad (3.3)$$

где  $P_{г.п}$  — пожарная нагрузка;  $P$  — масса горючих и трудногорючих материалов, кг;  $F$  — площадь пола помещения или открытой местности, м<sup>2</sup>.

В пожарную нагрузку помещений, зданий и сооружений входят не только оборудование, мебель, продукция, сырье и т.д., но и конструктивные элементы зданий, изготовленные из горючих или трудногорючих материалов, т.е. стены, пол, потолок, оконные переплеты, двери, стеллажи, перекрытия, перегородки и т.д. Пожарная нагрузка в помещениях делится на постоянную (горючие и трудногорючие материалы строительных конструкций, технологическое оборудование и т.п.) и временную (сырье, готовая продукция, мебель и т.п.). Пожарная нагрузка помещения определяется как сумма постоянной и временной нагрузки.

В зданиях пожарная нагрузка для каждого этажа определяется отдельно. Масса горючих элементов чердачного перекрытия и покрытия включается в пожарную нагрузку чердака. Величина

пожарной нагрузки для некоторых помещений принимается следующей:

для жилых, административных и промышленных зданий величина пожарной нагрузки не превышает  $50 \text{ кг/м}^2$  (если основные элементы зданий негорючие);

средняя величина пожарной нагрузки в жилом секторе составляет для однокомнатных квартир -  $27 \text{ кг/м}^2$ , для двухкомнатных -  $30 \text{ кг/м}^2$ , для трехкомнатных -  $40 \text{ кг/м}^2$ ;

в зданиях III степени огнестойкости пожарная нагрузка составляет  $100 \text{ кг/м}^2$ ;

в производственных помещениях, связанных с производством и обработкой горючих веществ и материалов, пожарная нагрузка составляет от  $250$  до  $500 \text{ кг/м}^2$ ;

в складских помещениях, сушилках и т.п. пожарная нагрузка достигает  $1000-1500 \text{ кг/м}^2$ ;

в помещениях, в которых расположены линии современных технологических процессов и в высокостеллажных складах она составляет  $2000-3000 \text{ кг/м}^2$ .

Для твердых горючих материалов важное значение имеет структура пожарной нагрузки (т.е. ее дисперсность) и характер ее пространственного размещения (плотно уложенными рядами, отдельными штабелями или пачками, сплошное расположение или с разрывом, горизонтальное, наклонное, вертикальное и т.д.). Например, одни и те же картонные коробки с обувью или рулоны (тюки) ткани, уложенные горизонтально на полу склада подвального типа и на стеллажах складов высотой 8-16 м и более дадут принципиально различную картину динамики пожара. Во втором случае пожар будет развиваться и распространяться в 5-10 раз быстрее, чем в первом. Другой пример: листовая бумага и обои, как правило, выгорают полностью, по всей поверхности на ранних стадиях пожара. В то же время рулоны бумаги почти не горят. Горение рулонов возможно только после продолжительного прогрева их до температуры, значительно превышающей температуру начала пиролиза бумаги. Из примеров видно, как интенсивность горения зависит от относительной площади свободной поверхности горючего материала.

Степень достаточной "открытости" для горения зависит от размеров самой поверхности горючего материала, интенсивности газообмена и др. Для спичек зазор в 3 мм достаточен, чтобы каждая спичка горела со всех сторон, а для деревянной плиты размером  $2000 \times 2000 \text{ мм}$  зазор в 10-15 мм недостаточен для свободного горения. На практике свободной счита-

ют поверхность, отстоящую от другой близлежащей поверхности на расстоянии 20-50 мм. Для учета свободной поверхности пожарной нагрузки введен коэффициент поверхности горения  $K_{\Pi}$ . Коэффициентом поверхности горения называют отношение площади поверхности горения  $F_{\Pi.Г}$  к площади пожара  $F_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = \frac{F_{\Pi.Г}}{F_{\Pi}}, \quad (3.4)$$

При горении жидкостей в резервуарах  $K_{\Pi}$  равен единице. При горении твердых материалов  $K_{\Pi}$  больше единицы. По этой причине для одного и того же вида твердого горючего материала, например, древесины, почти все параметры пожара будут различными в зависимости от  $K_{\Pi}$  (горение бревен, досок, стружки). Подсчет фактических значений  $K_{\Pi}$  для различных видов пожарной нагрузки производят заранее. В приложении табл. IX, X приведены значения  $K_{\Pi}$  для типовых вариантов планировки штабелей и стеллажей твердых горючих материалов в складских зданиях различной степени огнестойкости, а также значения  $K_{\Pi}$  пожарной нагрузки для отдельных цехов мебельных фабрик (здания цехов I и II степени огнестойкости).

Коэффициент поверхности горения для некоторых видов изделий и объектов приведен в приложении табл. XI, XII.

Для большинства видов пожарной нагрузки величина  $K_{\Pi}$  не превышает 2-3, редко достигая 4-5. Коэффициент поверхности горения определяет фактическую величину площади горения, массовую скорость выгорания, интенсивность тепловыделения на пожаре, теплонапряженность зоны горения, температуру пожара, скорость его распространения и другие параметры пожара.

### § 3.2. Зоны пожара

Для изучения пожаров, для научно обоснованной системы мер профилактики, для четкой организации руководства боевыми действиями подразделений по тушению пожаров и других целей пространство, в котором происходит пожар, и вокруг него условно делят на три зоны: горения; теплового воздействия; задымления. Эти зоны, как правило, не имеют строгих и четких границ.

Зона горения. Зоной горения называется часть пространства, в котором происходит подготовка горючих веществ к горению (подогрев, испарение, разложение) и их горение. Она вклю-



Зоны горения

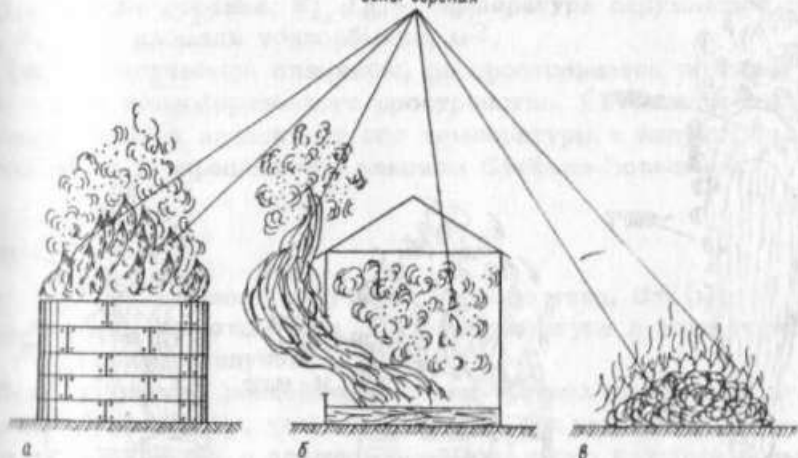


Рис.3.2. Зоны горения на пожарах: а – при горении жидкости в резервуаре; б – при горении внутри здания; в – при горении угля

часть в себя объем паров и газов, ограниченный собственно зоной горения и поверхностью горящих веществ, с которой пары и газы поступают в объем зоны горения. При беспламенном горении и тлении, например, хлопка, кокса, войлока, торфа и других твердых горючих веществ и материалов зона горения совпадает с поверхностью горения. Иногда зона горения ограничивается конструктивными элементами – стенами здания, стенками резервуаров, аппаратов и т.д. Характерные случаи пожаров и зоны горения на них показаны на рис.3.2. Зона горения является теплогенератором на пожаре, так как именно здесь выделяется все тепло и развивается самая высокая температура. Однако процесс тепловыделения происходит не во всей зоне, а во фронте горения, и здесь же развиваются максимальные температуры. Внутри факела пламени температура значительно ниже, а у поверхности горючего материала еще ниже. Она близка к температуре разложения для твердых горючих веществ и материалов и к температуре кипения жидкости для ЛВЖ и ГЖ. Схемы распределения температур в факеле пламени при горении газообразных, жидких и твердых веществ показаны на рис.3.3.

Зона теплового воздействия. Зоной теплового воздействия называется часть пространства, примыкающая к зоне горения, в котором тепловое воздействие приводит к заметному изменению состояния материалов и конструкций и делает невозмож-

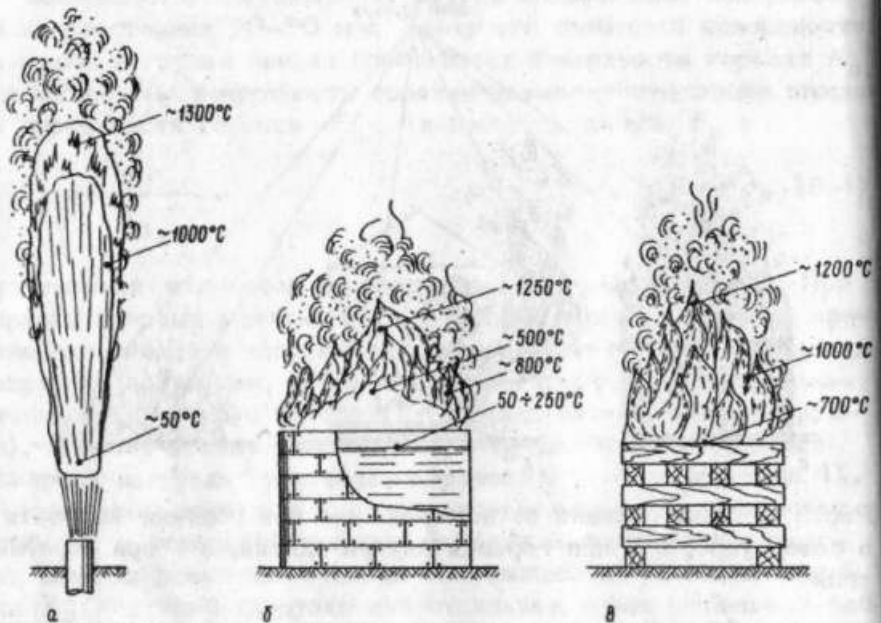


Рис.3.3. Распределение температур в пламени при горении: а – газообразных веществ; б – жидкостей; в – твердых материалов

ным пребывание в нем людей без специальной тепловой защиты (теплозащитных костюмов, отражательных экранов, водяных завес и т.п.).

Если в зоне теплового воздействия находятся горючие вещества или материалы, то под действием тепловых потоков происходит их подготовка к горению, создаются условия для их воспламенения и распространения огня. С распространением зоны горения границы зоны теплового воздействия расширяются, и этот процесс повторяется непрерывно.

Тепло из фронта горения распространяется в окружающее пространство как конвекцией, так и излучением. Конвективные токи горячих газов направлены преимущественно вверх, а количество тепла, переносимое ими в единицу времени, пропорционально градиенту температур между газом-теплоносителем и теплопринимающей средой и коэффициенту теплообмена и определяется законом Ньютона:

$$Q_K = \alpha_K (T_{\Gamma} - T_0) F, \quad (3.5)$$

где  $\alpha_K$  - коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_r$  - температура в зоне горения, К;  $T_0$  - температура окружающей среды, К;  $F$  - площадь теплообмена, м<sup>2</sup>.

Тепло, излучаемое пламенем, распространяется по всем направлениям полусферического пространства. Интенсивность излучения пламени зависит от его температуры и излучательной способности и определяется законом Стефана-Больцмана:

$$Q = \sigma_0 \epsilon T_r^4 F; \quad (3.6)$$

где  $\sigma_0$  - коэффициент излучения черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\epsilon$  - степень черноты тела;  $T_r$  - температура в зоне горения, К;  $F$  - площадь излучения, м<sup>2</sup>.

Зона теплового воздействия на внутренних пожарах будет меньше по размерам, чем на открытых, так как стены здания играют роль экранов, а площадь проемов, через которые возможно излучение, невелика. Кроме того, дым, который выделяется на внутренних пожарах, резко снижает интенсивность излучения, поскольку является хорошей поглощающей средой. Направления передачи тепла в зоне теплового воздействия на открытых и внутренних пожарах также различны. На открытых пожарах верхняя часть зоны теплового воздействия энергетически более мощная, поскольку конвективные токи и излучение совпадают по направлению. На внутренних пожарах направление передачи тепла излучением может не совпадать с передачей тепла конвекцией, поэтому зона теплового воздействия может состоять из участков, где действует только излучение или только конвекция или где оба вида тепловых потоков действуют совместно.

При тушении пожара необходимо знать границы зоны теплового воздействия. Ближней границей зоны теплового воздействия является зона горения, а дальняя определяется по двум показателям: или по термодинамической температуре в данной точке пространства или по интенсивности лучистого теплового потока. По температуре граница зоны теплового воздействия принимается в той части пространства, где температура среды превышает 60-70°С. При данной температуре невозможно длительное пребывание людей и выполнение ими активных боевых действий.

За дальнюю границу зоны теплового воздействия по интенсивности лучистого теплового потока принимают такое удаление от зоны горения, где лучистое тепло, воздействуя на незащищенные части тела человека (лицо, руки) вызывают боле-

вое ощущение не мгновенно, а через промежуток времени, соизмеримый с оперативным временем, т.е. временем, необходимым для активного воздействия бойца, вооруженного средствами тушения, на основные параметры пожара. Численную величину этого времени следует определять экспериментально на характерных реальных пожарах. Для внутренних пожаров в зданиях при средней интенсивности их развития, при современном вооружении бойца (например, стволом тонкораспыленной воды, с раствором смачивателя или загустителя) это время условно можно принять равным 15 с. Тогда по экспериментальным данным за дальнюю границу зоны теплового воздействия можно условно принять интенсивность лучистого потока примерно 3500 Вт/м<sup>2</sup> (табл. XIII приложения).

В табл.3.2 приведены значения интенсивности излучения пламени при горении штабелей древесины на различном расстоянии от них.

Таблица 3.2

Высота штабелей, м, ширина 14 м	Максимальная высота пламени, м	Максимальная температура пламени, °С	Интенсивность излучения пламени, Вт/м <sup>2</sup> , на расстоянии			
			10 м	15 м	20 м	25 м
6	8	1300	13980	11890	8500	4540
9,5	12	1300	13980	12580	9070	4890

Из табл.3.2 видно, что расстояние для присутствия людей, не защищенных специальными средствами от лучистой энергии пожара, составляет 27-30 м. При тех же размерах штабеля, но с другим коэффициентом поверхности это расстояние может существенно измениться, тогда высота пламени увеличится или уменьшится за счет изменения площади горения, а следовательно, и выхода летучих из древесины. Безопасное расстояние при пожарах штабелей древесины может быть определено по эмпирической формуле

$$L_{\text{без}} = 1,6H, \quad (3.7)$$

где  $H$  - общая высота штабеля и пламени, м.

На рис.3.4 и 3.5 приведены графики, показывающие изменение интенсивности излучения пламени на различных расстоя-

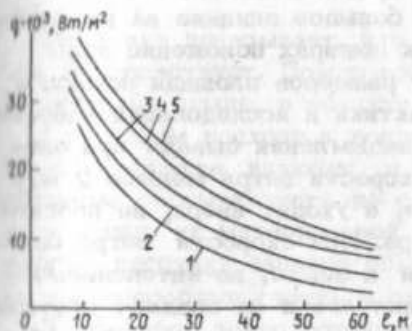


Рис.3.4

Рис.3.4. Зависимость интенсивности излучения пламени от расстояния при горении штабелей древесины различной высоты: 1 -  $h = 5$  м; 2 -  $h = 6$  м; 3 -  $h = 8$  м; 4 -  $h = 10$  м; 5 -  $h = 12$  м

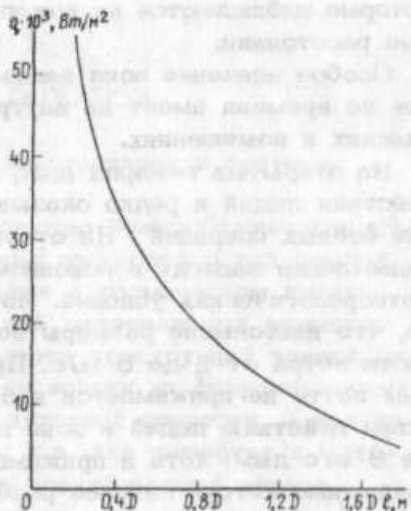


Рис.3.5

Рис.3.5. Зависимость интенсивности излучения пламени от расстояния до горящего резервуара с ЛВЖ или ГЖ

них от него при пожарах резервуаров и штабелей древесины. Зная допустимые или предельные значения интенсивности излучения, можно найти расстояния, обеспечивающие безопасную работу пожарной техники и личного состава подразделений.

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

Зона задымления может частично включать в себя зону горения и всю или часть зоны теплового воздействия. Как правило, зона задымления - самая большая часть пространства. Это объясняется тем, что дым представляет собой аэрозоль (смесь воздуха с газообразными продуктами полного и неполного горения и мелкодисперсной твердой и жидкой фазой), поэтому он легко вовлекается в движение даже слабыми конвективными токами, а при наличии мощных конвективных токов,

которые наблюдаются на пожарах, дым разносится на значительные расстояния.

Особое значение зона задымления и изменение ее параметров во времени имеет на внутренних пожарах, при пожарах в зданиях и помещениях.

На открытых пожарах дым, как правило, уходит выше зоны действия людей и редко оказывает большое влияние на выполнение боевых операций. На открытых пожарах положение зоны задымления зависит в основном от размеров площади пожара и метеорологических условий. Из практики и исследований известно, что наибольшие размеры зоны задымления бывают при скорости ветра от 2 до 8 м/с. При скорости ветра меньше 2 м/с дым почти не прижимается к земле, а уходит вверх, не препятствуя действию людей в зоне пожара. При скорости ветра больше 8 м/с дым хоть и прижимается к земле, но интенсивные воздушные потоки сильнее разбавляют его и не создают плотного задымления, препятствующего выполнению боевых действий.

Параметрами для определения внешних предельных границ зоны задымления являются: степень видимости в зоне задымления; концентрация кислорода, которая не должна быть ниже 12-15% для обеспечения жизнедеятельности человека; наличие опасных концентраций токсичных продуктов пиролиза и горения материалов.

Плотность дыма, состав продуктов горения и пиролиза, скорость дымовыделения и другие параметры его зависят от химической структуры горючего материала, его плотности, размеров, от теплового потока, поступающего к нему, температуры горения, от аэродинамических условий горения и коэффициента избытка воздуха.

В приложении табл. XIV приведены виды токсичных газов, выделяющихся при горении различных веществ и материалов на пожарах.

Дым еще характеризуется температурой. При температуре среды 60-70°C и большой влажности воздуха создаются тяжелые условия для организма человека, особенно при физической работе. Таким образом, четкой внешней границы зоны задымления нет. В этом случае пользуются практическими рекомендациями по работе личного состава в зоне задымления.

## ЭНЕРГЕТИКА ПОЖАРОВ

## § 4.1. Объект пожара как энергетическая система

Практика показывает, что абсолютно пожаробезопасных объектов не существует. Пожар возможен под водой и под землей, на воде, на земле, в воздухе и даже в космическом полете.

При таком подходе к вопросу все материальные элементы данного объекта, включая и элементы конструкций зданий, необходимо рассматривать не с точки зрения их функционального назначения, их материальной или духовной ценности, а как пожарную нагрузку данного объекта, т.е. как вещества и материалы, способные гореть в случае возникновения пожара.

Тогда весь запас потенциальной химической энергии  $E_0$ , сосредоточенной на данном объекте пожара и способной выделиться в виде тепловой энергии или теплоты пожара при его возникновении, может быть выражен через суммарную массу горючих веществ и материалов  $P$  и их теплотворную способность или их теплоту сгорания  $Q^P$ .

Наиболее просто запас потенциальной химической энергии можно определить, когда горючий материал однороден, например, для резервуара с горючей жидкостью, склада пиломатериалов или для других подобных им объектов. Тогда весь запас потенциальной химической энергии, которая может выделиться в виде тепловой энергии пожара, можно записать в следующем виде:

$$E_0 = \beta Q^P_N P, \quad (4.1)$$

где  $E_0$  — потенциальный запас химической энергии, переходящий в теплоту пожара, кДж;  $\beta$  — коэффициент полноты сгорания (коэффициент химического и физического недожога);  $P$  — масса горючего материала, кг;  $Q^P_N$  — низшая теплота сгорания, кДж/кг.

Для объектов, содержащих разнородные горючие вещества и материалы,  $E_0$  определяется как сумма теплот сгорания всех видов, имеющихся на объекте горючих веществ:

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i Q^P_{Ni} P_i \quad (4.2)$$

Большинство современных зданий построено преимущественно из негорючих материалов, и вся пожарная нагрузка размещается в основном на полу более или менее равномерно. Тогда  $E_0$  для таких объектов может быть определена по формуле

$$E_0 = \beta Q_n^p P_{г.н} F_{\text{пола}} \quad (4.3)$$

где  $F_{\text{пола}}$  - площадь помещения или площадь размещения пожарной нагрузки;  $P_{г.н}$  - удельная или приведенная пожарная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>.

А для объектов с существенно разнородной пожарной нагрузкой  $E_0$  может быть рассчитана по формуле вида:

$$E_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i Q_{н_i}^p P_{г.н_i} F_i \quad (4.4)$$

или

$$E_0 = \beta_1 Q_{н_1}^p P_{г.н_1} F_1 + \beta_2 Q_{н_2}^p P_{г.н_2} F_2 + \dots + \beta_n Q_{н_n}^p P_{г.н_n} F_n,$$

где индексы 1, 2, ... - относятся соответственно к каждому виду пожарной нагрузки в отдельности, отражая ее полноту сгорания, площадь ее размещения, ее удельную теплоту сгорания и т.д.

Зная величину полного запаса потенциальной химической энергии, заключенной во всех горючих и трудногорючих веществах, расположенных на объекте, можно вычислить полную продолжительность пожара, если известно, с какой интенсивностью этот запас энергии будет расходоваться. И наоборот, рассчитать интенсивность тепловыделения на пожаре, если бы могли вычислить его полную продолжительность (при условии, что процесс пожара был равномерным, стационарным в течение всего времени его горения).

Рассматривая все содержимое данного объекта как пожарную нагрузку, обладающую некоторым потенциальным запасом тепловой энергии, сам процесс горения на пожаре можно рассматривать как своеобразную форму самопроизвольного выделения (т.е. освобождения) и расходования  $E_0$  в виде тепловой энергии пожара ( $Q_{п}$  или  $E_{п}$ ):

$$Q_{п} = E_{п} = \frac{dE}{dt} \quad (4.5)$$

Записать аналитическую зависимость  $Q_{п} = f(t)$  в явном



виде для большинства реальных пожаров не представляется возможным, так как она обусловлена закономерностями сложного процесса диффузионного горения на пожаре. Закономерности процесса горения и их зависимость от наиболее существенных параметров объекта пожара и определяют интенсивность тепловыделения на пожаре, температуру пожара, его продолжительность, сложность боевой обстановки на пожаре, размеры материального ущерба и многое другое. И поскольку описать эти зависимости в общем виде для широкого класса пожаров не представляется возможным, рассмотрим отдельно несколько простейших частных случаев, когда интенсивность процесса выделения энергии на пожаре поддается описанию.

#### § 4.2. Стационарное горение жидкости в резервуаре (первый частный случай)

Рассмотрим пожар в резервуаре с горючей жидкостью, на котором можно установить связь временных и энергетических параметров. Допустим, что горение происходит на открытом воздухе при полном отсутствии ветра. Это означает, что приток воздуха в зону горения и отток продуктов горения происходят по законам естественной конвекции. Допустим также, что жидкость однородна и начальная температура ее значительно выше температуры воспламенения.

Если площадь горючей жидкости достаточно велика и воспламенение паровоздушной смеси произошло не над всей свободной поверхностью, то пламя быстро распространится по зеркалу жидкости со скоростью 5-6 см/с на нижнем и верхнем концентрационных пределах и 45-50 см/с для смесей состава, близкого к стехиометрическому. Для резервуара емкостью 10 000 м<sup>3</sup>, диаметром 30 м при поджигании жидкости у борта это время составляет примерно 1 мин. Так как жидкость в резервуаре однородна (по химическому составу), то и в процессе выгорания состав будет постоянным. Наконец, последнее допущение, что высота свободного борта не оказывает существенного влияния на процесс горения (т.е. борт тоже "выгорает по мере опускания уровня жидкости в резервуаре). Тогда после прогрева поверхностного слоя жидкости до температуры кипения (за сравнительно малый промежуток времени 1-2 мин) процесс горения станет стационарным (т.е. параметры процесса горения не будут изменяться во времени). Если резервуар - прямой круговой цилиндр объемом  $V_D$ , то масса горючей жидкости в начальный момент пожара будет:

$$P_{Г.ж} = V \rho_{Г.ж} = \frac{\pi D^2}{4} H \rho_{Г.ж};$$

$$E_0 = \beta Q_{п}^p \rho_{Г.ж} = \beta Q_{п}^p \frac{\pi D^2}{4} H \rho_{Г.ж}, \quad (4.6)$$

где  $D_p$  - диаметр резервуара, м;

$H_p$  - высота уровня жидкости в резервуаре, м;

$\rho_{Г.ж}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В данном случае площадь пожара совпадает с площадью свободной поверхности горючей жидкости, а площадь поверхности горения с площадью пожара. Тогда количество жидкости, выгорающей в единицу времени со всей площади пожара, т.е. массовая скорость выгорания,  $v_M$  будет равна:

$$v_M = v_M' F_{п}, \quad (4.7)$$

где  $v_M'$  - приведенная скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Количество тепла, выделяемого в единицу времени, определяется по формуле

$$Q_{п} = \beta Q_{п}^p v_M = \beta Q_{п}^p v_M' \frac{\pi D^2}{4}. \quad (4.8)$$

Это и есть скорость расходования первоначального запаса потенциальной энергии, которая превращается в тепловую энергию пожара или в теплоту пожара, причем с постоянной скоростью, так как скорость выгорания принята постоянной. Тогда общая продолжительность пожара  $\tau_{п}$  до полного израсходования всего первоначального запаса энергии будет:

$$\tau_{п} = \frac{E_0}{Q_{п}}. \quad (4.9)$$

Так как были приняты условия, что  $v_M = \text{const}$ ;  $F_{п} = \text{const}$ , то и  $v_M = \text{const}$ . Тогда, подставляя (4.1) и (4.8) в (4.9), получим:

$$\tau = \frac{P_{Г.ж}}{v_M}. \quad (4.10)$$

То есть, когда горение горючего материала происходит с постоянной скоростью, уравнение сохранения энергии сводится к уравнению сохранения массы горючего вещества, так как  $v_M$  - секундная скорость выгорания. Время полного выгорания

всей горючей жидкости в резервуаре может быть выражено через линейную скорость опускания уровня жидкости. Подставив в уравнение (4.9) значения  $E_0$  и  $Q_{II}$  из уравнений (4.1), (4.6) и (4.8), после сокращения получим:  $r = \frac{E_0}{Q_{II}} = \frac{H_p \rho_{г.ж}}{v_M^*}$  или

$$r = \frac{H_p}{v_0} \quad (4.11)$$

так как  $v_M^* = v_0 \rho_{г.ж}$ ,

где  $v_0$  - скорость опускания уровня жидкости в резервуаре, которая при принятых условиях будет практически постоянна и равна  $v_0 = \frac{v_M}{\rho_{ж}}$ . Тогда интенсивность тепловыделения на пожаре определим по формуле (4.9)

$$Q_{II} = \frac{E_0}{r_{II}}$$

#### § 4.3. Нестационарное горение жидкости в резервуаре (второй частный случай)

Рассмотрим случай, более близкий к реальному режиму горения жидкости со свободной поверхностью в резервуаре.

Сохранив все допущения первого случая, учтем лишь то, что на реальных пожарах высота свободного "сухого" борта возрастает по мере опускания уровня жидкости в резервуаре. В реальных условиях скорость выгорания жидкости непостоянна во времени,  $v_M \neq const$ ,  $v_M \neq f_1(r)$ , а приведенная скорость выгорания неодинакова по поверхности горючей жидкости, т.е.  $v_M^* = f_2(r_i)$ , где  $r_i$  - текущее значение радиуса элементарного кольцевого участка  $f_i$  на поверхности жидкости.

Массовая скорость выгорания даже однородной горючей жидкости зависит от поля температур поверхностного слоя и условий газообмена над ее поверхностью. В начале пожара  $v_M$  меньше, чем при развившемся. Кроме того, на реальном пожаре скорость выгорания жидкости со свободной поверхности резервуара непостоянна. Во-первых, начиная с некоторого момента времени она возрастает из-за теплового воздействия горючего "сухого" борта. Интенсивность выгорания возрастает не только в результате прогрева поверхностного слоя жидкости до температуры кипения за счет лучистого теплового потока

от факела пламени, но и за счет более интенсивного подвода тепла к жидкости через прогретый до высокой температуры металлический борт резервуара (если борт не охлаждается снаружи). Во-вторых, достигнув максимума,  $v_M$  не остается постоянной, так как интенсивность выгорания начинает снижаться за счет ухудшения условий смешения паров горючей жидкости с окружающим воздухом, т.е. из-за ухудшения условий доступа кислорода в зону горения. Кроме того, при опускании уровня жидкости внутрь резервуара ее поверхность будет все больше удаляться от зоны горения. Поэтому интенсивность лучистого потока от факела пламени к зеркалу жидкости будет уменьшаться. Снизится и тепловой поток через стенку резервуара, так как она будет охлаждаться за счет теплоотдачи в окружающий воздух (при достаточно большой высоте свободного борта), и температура поверхностных слоев горючей жидкости, и интенсивность испарения.

В результате этого снизится массовая скорость выгорания горючей жидкости и соответственно — интенсивность тепловыделения на пожаре. Скорость выгорания теперь непостоянна во времени, а значит, непостоянна и интенсивность тепловыделения:

$$v_M = f(r); \quad Q_{II} = f(r),$$

если предположим, что  $\beta$  и  $F_{II}$  будут постоянны.

Для начального и конечного периодов пожара, когда скорость выгорания горючей жидкости становится функцией времени, ее следует вычислять отдельно для любой стадии пожара и для каждого участка поверхности жидкости, на котором температура в данный момент времени может быть условно принята постоянной. Для данного участка поверхности (кольцевого пояса  $f_i$ , радиуса  $r_i$ ) локальная массовая скорость выгорания, определяемая по времени, рассчитывается по выражению вида:

$$v_M^{\text{лок}} \frac{1}{r} \int_r v_M^*(r) dr. \quad (4.12)$$

Приведенная массовая скорость выгорания, осредненная по всей поверхности резервуара за этот промежуток времени, может быть определена по выражению вида:

$$v_M^* = \frac{1}{F_{II}} \int_f v_M^{\text{лок}}(r) dr = \frac{1}{F_{II}} \int_r \int_r v_M^*(r;r) dr dr. \quad (4.13)$$

Общая массовая скорость выгорания пожарной нагрузки описывается выражением  $v_M = \frac{1}{r} \int \int v_M'(r; f) df dr$ . Соответственно

интенсивность тепловыделения на пожаре, как производная от скорости выгорания, будет  $Q_{II} = \beta Q_{II}^p v_M$

или

$$Q_{II} = \frac{\beta Q_{II}^p}{r} \int \int v_M'(r; f) df dr. \quad (4.14)$$

Продолжительность пожара, выраженная через  $Q_{II}$  и  $E_0$ , будет равна:

$$\tau_{II} = \frac{E_0}{Q_{II}} = \frac{\beta Q_{II}^p P \tau_{II}}{\beta Q_{II}^p \int \int v_M'(r; f) df dr}. \quad (4.15)$$

После сокращения получим:

$$P = \int \int v_M'(r; f) df dr. \quad (4.16)$$

При этом условию принимается, что коэффициент полноты сгорания  $\beta$  не зависит от условий горения за время  $\tau_i$  на участке поверхности жидкости  $f_i$ . Пользуясь теоремой о среднем и подставив пределы интегрирования от 0 до  $\tau_{II}$ , выражение  $\int_0^{\tau_{II}} v_M'(r; f) dr$  принимаем  $v_M^{cp}(r_{cp}; f) \tau_{II}$ .

Применяя теорему о среднем к интегралу по площади поверхности резервуара (когда скорость выгорания считают равномерной по всей поверхности жидкости), можно записать:

$$\int_0^{\tau_{II}} v_M'(r; f) df = v_M^{cp}(r; f_{cp}) F_{II} = v_M^{cp}, \quad (4.17)$$

тогда

$$P = v_M^{cp} \tau_{II}, \quad (4.18)$$

т.е. через энергетические параметры пожара опять можно определить продолжительность пожара  $\tau_{II} = \frac{P}{v_M^{cp}}$ , как и в первом частном случае (4.10), и интенсивность тепловыделения на пожаре выразить через  $Q_{II} = \beta Q_{II}^p v_M^{cp}$ .

Задача расчета параметров пожара во втором частном случае усложнилась, так как попытались учесть неравномерность

интенсивности расходования первоначального запаса потенциальной энергии объекта пожара по площади горения и нестационарность этого процесса во времени.

#### § 4.4. Горение твердых горючих материалов (третий частный случай)

Задача еще более усложняется, если перейти к рассмотрению пожаров, связанных с горением твердых горючих материалов. Во-первых, площадь поверхности горения не совпадает с площадью пожара. Для упрощения задачи вводят условно коэффициент поверхности горения  $K_{\Pi}$  :

$$K_{\Pi} = \frac{F_{\Pi \cdot Г}}{F_{\Pi}} .$$

Во-вторых, скорость выгорания зависит от пространственной ориентации поверхности горящего материала и координат его положения на пожаре. В-третьих, скорость выгорания твердых горючих материалов зависит от их температуры во времени и изменения свойств самого горючего материала по мере его выгорания, если речь идет о ТГМ типа древесины, угля, торфа и др. И наконец, начинается и кончается процесс горения неодновременно на различных участках поверхности горючего материала, т.е. величина площади поверхности горения меняется во времени. В этом частном случае  $v_M = f(\tau; x; y; z)$ , так как  $v_M \neq \text{const}$  и  $F_{\Pi} \neq \text{const}$ .

Для установления зависимостей, в частности,  $F_{\Pi} = f(\tau)$ , необходимы дополнительные данные о скорости распространения горения на пожаре по поверхности твердых горючих материалов, об интенсивности и продолжительности их выгорания, а также продолжительности их горения по механизму гомогенного диффузионного пламенного горения и условиях перехода к гетерогенному режиму горения. На пожаре, связанном с горением твердых горючих веществ и материалов, даже равномерно распределенных по площади, вычислить размер площади горения довольно сложно, так как горение начинается не одновременно по всей поверхности горючего материала, а только на той ее части, где первоначально возник процесс горения. На следующих участках оно возникнет только после того, как на них распространится зона горения. А продолжительность горения этих участков зависит от вида горючего материала, скорости его вы-

горения и его количества. Поэтому и прекращается процесс горения не сразу по всей площади пожара, а постепенно, по участкам, по мере выгорания пожарной нагрузки. Условно можно записать, что  $\tau_{\Pi} = \tau_{\text{распр}} + \tau_{\text{выг}}$ , если время распространения горения на пожаре соизмеримо с временем выгорания пожарной нагрузки, т.е. когда  $\tau_{\text{распр}} \approx \tau_{\text{выг}}$ . Когда  $\tau_{\text{распр}} \ll \tau_{\text{выг}}$  - случай нераспространяющегося пожара. И в расчет можно принимать только  $\tau_{\text{выг}}$  (например, как в первом и во втором частных случаях при пожарах над свободной поверхностью ЛВЖ, ГЖ в резервуарах). Когда  $\tau_{\text{распр}} \gg \tau_{\text{выг}}$ , - пожар с перемещающейся зоной горения, который условно можно назвать распространяющимся, но не развивающимся, если площадь зоны горения не увеличивается по времени, а только перемещается по поверхности горючего материала. Тогда в расчет можно принимать только  $\tau_{\text{распр}}$ . В более общем случае, когда время перемещения зоны горения соизмеримо со временем выгорания, следует учитывать оба параметра. Но  $\tau_{\text{распр}} = \frac{L}{v_p}$ ,

где  $L$  - путь перемещения зоны горения, м;

$v_p$  - линейная скорость распространения горения, м/с, м/мин.

Для текущего момента времени развития пожара площадь горения условно выразим так:  $F_{\Pi i} = K_{\Pi} [v_p(\tau) \tau_p]^n$ , где  $K_{\Pi}$  и  $n$  - зависят от формы площади пожара.

Если можно было бы в явном виде записать выражение, описывающее закон изменения скорости выгорания пожарной нагрузки и площади пожара от времени, то через полный запас энергии на объекте и скорость ее выделения на пожаре в процессе горения определили бы полное время горения данного объекта:

$$\tau_{\Pi} = \frac{E_0}{Q_{\Pi}} = \frac{P}{v_M}$$

То есть, как в предыдущих случаях,  $Q_{\Pi} = \frac{E_0}{\tau_{\Pi}}$ . Но в этом случае

нельзя выразить значение  $v_M$  через средние величины (как во втором частном случае), так как сам параметр интегрирования  $F_i$  (площадь пожара) есть функция времени. Причем функция, зависящая от  $v_p$  и  $v_M$ , где  $v_p$  и  $v_M$  тоже переменные величины, зависящие от времени.

#### § 4.5. Горение неоднородных горючих материалов (четвертый частный случай)

Рассмотрим пожар, связанный с горением неоднородных твердых горючих веществ и материалов, неравномерно распределенных по площади. Тогда полный запас потенциальной химической энергии всех горючих веществ и материалов необходимо определять как сумму запасов энергии для каждого участка:

$$E_0 = \sum_{i=1}^n E_{0i} = \sum_{i=1}^n \beta_i Q_{\Pi i} P_{г.и.} F_i$$

Подставив значения  $E_0$  в уравнения (4.14), (4.15) и учтя дополнительные связи определяющих параметров процессов горения на пожаре, вытекающие из третьего частного случая, смогли бы решить задачу в общем виде и для этого наиболее сложного случая.

Таким образом, энергетический подход к пожару является наиболее общим. Он более полно отражает физическую сущность основных процессов пожара. Но для его практической реализации недостаточно данных. Основными из них являются скорость и направление распространения горения на пожаре, продолжительность пламенного горения и их зависимость от вида твердых горючих материалов, условий их размещения, температуры, условий газообмена и других факторов.

В ряде зарубежных стран пожарные специалисты (особенно представители страховых компаний) определяют (оценивают) степень пожарной опасности объектов по двум основным параметрам: по величине пожарной нагрузки, выраженной через ее тепловые эквиваленты ( $E_0$ ) и по интенсивности тепловыделения на пожаре ( $Q_{\Pi}$ ).

Аналогичные попытки предпринимаются и в нашей стране. В 1976 г. во ВНИИПО МВД СССР были проведены натурные испытания на модели реального помещения. На основании этих испытаний рекомендована система классификации объектов по степени их пожарной опасности (табл. 4.1) в зависимости от величины запасенной на объекте потенциальной химической энергии и интенсивности ее выделения при пожаре.

Еще одним подтверждением плодотворности энергетического подхода к пожару является разработка в 1979 г. нового стандарта СТ.СЭВ 446-77 (группа Ж09), где степень пожароопасности объекта рекомендуется определять по величине удельной пожарной нагрузки, которая рассчитывается по формуле вида:



Класс пожара	Теплонапряженность (удельная тепловая нагрузка) $E$ , мДж/м <sup>2</sup>	Эквивалент пожарной нагрузки в древесине ( $\sigma Q_H^p$ ) 16,76 мДж/кг) $q$ , кг/м <sup>2</sup>	Подкласс пожара	Интенсивность тепловыделения $Q_H$ , мДж/(м <sup>2</sup> ·с)	Эквивалентная массовая скорость выгорания древесины $v'_M$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
I	До 185	До 11	a b c	До 160 От 160 до 280 Более 280	Менее 0,01 От 0,01 до 0,0167 Более 0,0167
II	До 740	До 45	a b c	--	--
III	До 1850	До 110	a b c	--	--
IV	До 3700	До 220	a b c	--	--
V	Более 3700	Более 220	a b c	До 160 От 160 до 280 Более 280	Менее 0,01 От 0,01 до 0,0167 Более 0,0167

$$P_v = Pabc,$$

где  $P$  – пожарная нагрузка,  $\text{МДж}/\text{м}^2$ ;  $a$  – коэффициент скорости сгорания веществ и материалов в зависимости от их плотности и плотности их укладки;  $b$  – коэффициент скорости сгорания веществ и материалов в зависимости от параметров зданий или частей зданий;  $c$  – коэффициент, отражающий наличие противопожарной техники (средств автоматической противопожарной защиты).

Все эти величины и коэффициенты определяются по таблицам. После этого  $P_v$ , по существу, приобретает смысл рассмотренного выше параметра  $Q_{\text{п}}$ , отнесенного к единице площади пожара, с той разницей, что вся сложность определения этого параметра перенесена в таблицы, приведенные в приложении к стандарту, которые составлены по экспериментальным данным.

Анализ этой формулы и входящих в нее коэффициентов показывает, что в основу построения стандарта заложен рассмотренный выше энергетический подход к пожару.  $P$  – удельная пожарная нагрузка, которая при умножении на площадь ее размещения дает значение рассмотренного выше параметра  $E_0$ ; а коэффициенты  $a$  и  $b$  отражают интенсивность процесса тепловыделения при горении на пожаре. Первый –  $a$  в зависимости от вида, размеров и размещения горючего материала. А второй –  $b$  от условий газообмена на пожаре и тепловых параметров пожара, которые зависят от параметров здания или его частей (высоты помещения, отношения площади пожара к площади помещения, площади проемов, их формы и т.д.).

Такая классификация пожаров довольно условна, она почти не применяется на практике и введена только для удобства изучения курса. Но дальнейшее ее развитие с учетом вида горючего материала, его агрегатного состояния, условий и режимов горения может привести к более полной классификации всего многообразия пожаров по их физико-химическим особенностям и основным теплофизическим и газодинамическим параметрам, что, в свою очередь, позволит совершенствовать разрабатываемые меры защиты объектов от пожара методами пожарной профилактики и повысить эффективность их тушения силами и средствами пожарной охраны.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ОТКРЫТЫХ  
ПОЖАРОВ

## § 5.1. Открытые пожары и их отличительные особенности

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

Особенностью всех этих пожаров являются условия тепло- и газообмена. На этих пожарах не происходит "накопления" тепла в газовом пространстве зоны горения. Горение происходит в более естественных условиях, не ограниченных строительными конструкциями. Теплообмен осуществляется практически с неограниченным окружающим пространством. Поэтому за температуру таких пожаров, как правило, принимают температуру пламени, так как она несколько выше температуры внутренних пожаров, где за температуру пожара принимают среднюю температуру газовой среды в помещении.

Газообмен на открытых пожарах также отличается от газообмена на внутренних пожарах. На открытых пожарах он не ограничен конструктивными элементами зданий и сооружений и, следовательно, более интенсивен. Поэтому он в большей степени зависит от внешних естественных газовых потоков: интенсивности и направления ветра. Интенсивность и направление ветра оказывают большое влияние на процесс горения на открытых пожарах и на зоны пожара.

Зона горения определяется, главным образом, распределением горючих веществ в пространстве и формирующими ее конвективными газовыми потоками. Зона теплового воздействия определяется преимущественно лучистым тепловым потоком, так как конвективные тепловые потоки уходят вверх в

неограниченное пространство и почти не влияют на зону теплового воздействия на поверхности земли; поэтому они чаще всего не препятствуют ведению боевых действий на пожаре. Мощные восходящие конвективные газовые потоки у основания очага горения создают разрежение. Например, у основания газового фонтана, горящего резервуара эти потоки создают столь интенсивный обдув свежим воздухом, что несколько снижают тепловое воздействие.

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

#### § 5.2. Особенности пожаров на газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанах

Пожары фонтанов условно разделяют на три группы: газовые, газонефтяные и нефтяные. Газовыми считаются фонтаны с содержанием горючего газа не менее 95% по массе, газонефтяными — газа более 50% и нефти менее 50% по массе, а нефтяными — фонтаны с дебитом нефти более 50% по массе. Кроме того, газовые и газонефтяные фонтаны условно подразделяются по мощности (дебиту) на слабые — с дебитом газа до 2 млн.м<sup>3</sup>/сутки, средние — от 2 до 5 млн.м<sup>3</sup>/сутки и мощные — свыше 5 млн.м<sup>3</sup>/сутки.

При авариях на скважинах истечение газа из фонтанной арматуры происходит при высоких перепадах давления, значительно превышающих критический, т.е. на срезе трубы устанавливается скорость истечения, равная скорости звука. Для метана скорость звука равна приблизительно 400 м/с.

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

Горение газовых фонтанов устойчивое, которое может длиться неделями и даже месяцами и не зависит от метеорологических условий — ветра, дождя и т.п. Для ликвидации такого пожара необходимо огромное количество сил и средств.

Поскольку в реальных условиях истечение газа из фонтан-

ной арматуры происходит в основном со скоростями в несколько десятков и даже сотен метров в секунду (при  $Re > 2300$ ), то характер изменения поля скоростей и концентраций газа вдоль струи и в поперечных сечениях (отстоящих на различных расстояниях от места истечения) будут определяться основными закономерностями турбулентной газовой струи [4,10,35].

Рассматривая факелы газонефтяных фонтанов, можно пользоваться (с некоторыми поправками) основными закономерностями турбулентных газовых струй, так как при соотношении массы жидкой фазы (нефти) к массе газа около единицы отношение объемов газа и нефти будет около тысячи. По мере удаления от среза трубы (за счет массообмена струи с окружающим воздухом) это соотношение будет увеличиваться в десятки раз. Скорость движения капелек нефти в струе будет приблизительно равна скорости движения газовой фазы. Поэтому такую двухфазную струю можно рассматривать как свободную затопленную турбулентную струю. На рис.2.1 показано распространение турбулентной струи этилена из вертикальной трубы в воздух.

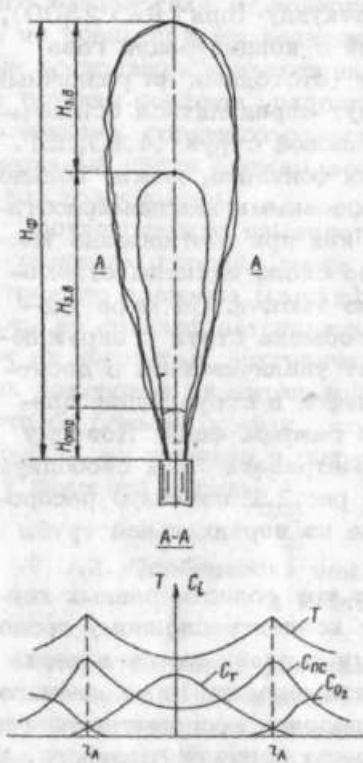
Из рисунка видно, что существуют три области равных концентраций, соответствующие нижнему концентрационному пределу воспламенения, стехиометрическому составу смеси и верхнему концентрационному пределу воспламенения. Ниже нижнего и выше верхнего концентрационных пределов воспламенений горение невозможно, так как ниже нижнего концентрационного предела воспламенения имеется избыток воздуха, а выше верхнего - избыток горючего газа. Горение будет идти с максимальной скоростью в области, соответствующей стехиометрическому составу смеси. На рис.5.1 показана структура турбулентной горячей струи в произвольном сечении А-А.

При турбулентном диффузионном горении концентрации газа  $C_G$  и кислорода  $CO_2$  падают до нуля в зоне горения, а концентрация продуктов горения  $C_{п.г}$  и температура достигают максимума. Образующиеся продукты горения диффундируют как в окружающее пространство, смешиваясь с воздухом, так и внутрь факела, смешиваясь с горючим газом.

Распространение пламени и воспламенение новых порций газа при турбулентном диффузионном горении осуществляется теплопроводностью и диффузией горячих продуктов горения. Положение поверхности горения и скорость горения определяются интенсивностью турбулентной диффузии.

Температура газа в ядре постоянных скоростей близка к температуре истечения газа. Максимальная температура пламе-

Рис.5.1. Структура турбулентной горящей струи газа



ни находится на поверхности стехиометрического состава. Воспламенение турбулентной струи газа осуществляется по периферии (по кольцевой области), где скорость распространения пламени имеет максимальное значение. По мере удаления от среза трубы зона высоких температур приближается к оси струи и на некотором расстоянии от среза трубы зона высоких температур достигает оси трубы. Это расстояние называется длиной зоны воспламенения  $H_{3.в}$ . Длина зоны воспламенения турбулентного диффузионного факела зависит от физико-химических свойств газа, от содержания атомов углерода в молекуле горючего. Длина зоны воспламенения тем больше, чем выше молекулярная масса горючего, так как для сгорания единицы массы газа должно поступить большее количество воздуха из окружающей атмосферы. И, наоборот, чем меньше молекулярная масса горючего, тем меньше длина зоны воспламенения.

В зоне догорания происходит догорание отдельных молей горючего, на которые разбивается струя в результате турбулентных пульсаций. Процесс смешения в этой зоне осуществляется в основном за счет молекулярной диффузии, кроме того, эта зона характеризуется значительным недостатком кислорода, поэтому сгорание газа происходит очень медленно, что обуславливает значительную длину зоны догорания. Длина зоны догорания определяется протяженностью пути движения молей газа за время их выгорания и пропорциональна скорости движения газа:

$$\frac{H_{3.д}}{d} \approx \frac{v r_d}{d}$$

фронт горения в турбулентном факеле пламени из-за турбулентных пульсаций масс горючего, воздуха и продуктов горения получается размытым, раздробленным на отдельные части и неустойчивым. Особенно это проявляется в зоне догорания.

Одним из важных параметров газового факела является его длина (высота). Под высотой факела горения понимается наблюдаемая визуально или "фотографическая" длина факела, а не "химическая".

Проведенными исследованиями [21] установлена экспериментальная зависимость между высотой факела пламени и дебитом газовой скважины:

$$H_{\text{ф}} = 23V^{0,4}, \quad (5.1)$$

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

Эта формула может быть использована для определения дебита фонтана по высоте пламени [21].

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

$$V = 0,0025 H_{\text{ф}}^2, \quad (5.2)$$

что соответствует высоте факела:

$$H_{\text{ф}} = 20\sqrt{V}. \quad (5.3)$$

Исследованиями установлено, что с увеличением расхода газа высота факела пламени растет медленно, причем на нее не оказывает существенного влияния диаметр насадка. Так, при расходе газа 2,2 млн.м<sup>3</sup>/сутки высота факела для насадков диаметром 150 и 250 мм составляет 33 м.

Высота пламени у газонефтяных фонтанов несколько больше, чем у газовых. Нефтяные фонтаны с большим дебитом нефти и незначительным содержанием газа имеют небольшую высоту факела пламени, примерно 20-30 м. Пламя газового фонтана имеет светло-желтую окраску. При пожарах газонефтяных фонтанов вся нефть, как правило, сгорает в воздухе, пламя имеет оранжевый цвет, иногда горение сопровождается клубами черного дыма. При пожарах нефтяных фонтанов только незначительная часть нефти успевает испариться и сгореть в воздухе, а большая ее часть выпадает на землю, разливается вокруг устья скважины и продолжает гореть. Нефтяной фонтан горит темным оранжевым пламенем с большим выделением черного дыма. Процесс истечения и горения факела фонтана со-

провождается сильным шумом (ревом), достигающим у устья 130 децибелл. В табл.5.1 приведена температура пламени газовых фонтанов.

Таблица 5.1

Диаметр устья скважины, м	Расход газа, м <sup>3</sup> /с	Максимальная температура пламени, К
0,15	6,78	1553
0,15	31,2	1623
0,2	6,55	1573
0,2	30,8	1633

Некоторое повышение температуры газового факела с увеличением дебита объясняется изменением степени турбулентности и скорости сгорания. Максимальный диаметр в верхней части турбулентного диффузионного факела пламени приблизительно определяется соотношением:

$$D_{\phi} = (0,1 \div 0,15)H_{\phi} \quad (5.4)$$

Для устойчивого горения факела пламени необходимо равенство скоростей распространения пламени и встречного газового потока. Рассмотрим более подробно процесс стабилизации факела пламени газового фонтана при высоких скоростях истечения газа.

На рис.5.2 схематично показан механизм стабилизации факела пламени в турбулентной свободной струе горючего газа.

Из теории горения известно, что для стабилизации фронта пламени необходимым условием является равенство скорости газового потока и скорости распространения пламени  $w_{п} = v_{т}$ . Кроме того, турбулентное горение характеризуется скоростями распространения пламени  $v_{т}$ , значительно большими нормальных. Турбулентная скорость распространения пламени  $v_{т}$  зависит от многих параметров, в том числе и от скорости потока горючей смеси [10]. На рис.5.3 показана зависимость  $v_{т}$  от концентрации смеси и скорости потока.

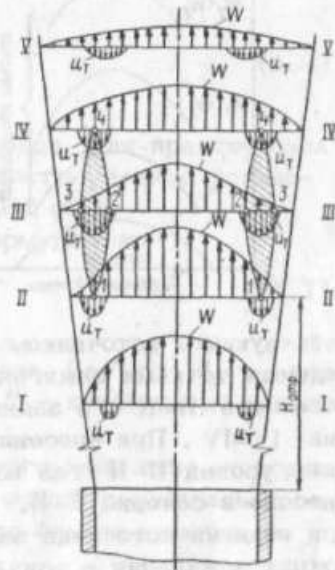
Турбулентная скорость распространения пламени  $v_{т}$  достигает нескольких метров в секунду (5-10 м/с), а в некоторых специальных топочных устройствах с искусственной турбулизацией потока (например, в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей) даже десятков метров в секунду. Поскольку при высоких давлениях скорость потока газа на срезе трубы  $w$



Рис.5.2. Схема стабилизации факела пламени газового фонтана

значительно превышает величину турбулентной скорости распространения пламени  $u_T$ , то факел пламени отрывается и процесс горения газа начинается на некотором расстоянии от среза трубы. Если скорость истечения газа мала, то пламя почти соприкасается с устьем. При увеличении скорости газа высота отрыва горящего факела увеличивается, и при некоторой скорости может произойти газодинамический срыв пламени, т.е. самопроизвольное потухание.

Рассмотрим физическую картину стабилизации пламени, показанную на рис.5.2. На рисунке в различных сечениях турбулентной струи приведены эпюры изменения концентрации газа и скорости потока газовой струи. А также построены характерные графики изменения турбулентной скорости распространения пламени от концентрации газовой смеси. Турбулентная скорость распространения пламени  $u_T$  возрастает от минимального значения на периферии струи (в зоне бедных смесей) до максимального значения в области стехиометрических смесей, а затем по мере приближения оси струи вновь падает до нуля — в зоне богатых смесей. В сечении I-I струи скорость потока значительно превышает турбулентную скорость распространения пламени  $w_{II} > u_T$ , поэтому в этом сечении горения газовой смеси не происходит. В сечении II-II эпюры  $u$  и  $w$  касаются в точках 1, составляющих окружность. Аналогичное соотношение для  $u_T$  и  $w_{II}$  имеется в сечении IV-IV для точек 4. В сечении III-III эпюра  $u_T$  пересекает эпюру  $w_{II}$  в двух точках 2 и 3. На участке между точками пересечения эпюр турбулентная скорость распространения пламени  $u_T$  больше скорости потока газа  $w_{II}$ , а на остальных участках меньше. Таким образом, при распространении турбулентного пламени газового фонтана на некотором расстоянии от среза трубы формируется гидродинамическая кольцевая область 1-2-4-3-1, в которой  $u_T = w_{II}$ . Эта область, расположенная по периферии струи, обеспечивает стабилизацию факела пламени постоянно



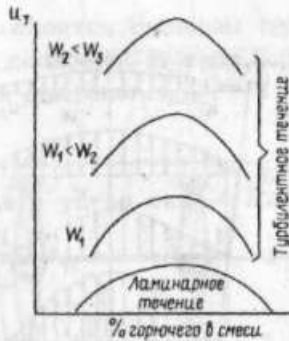


Рис.5.3. Зависимость турбулентной скорости распространения пламени от концентрации горючего в смеси и скорости потока

действующим источником зажигания – зажигающим кольцом. Передними точками зажигания являются точки 1, расположенные в сечении II–II, а задними – точки 4, расположенные в сечении IV–IV. При внесении источника зажигания в струю газа ниже уровня II–II газ воспламенится, но потоком пламя будет смещено в сечение II–II, где будет существовать устойчиво при изъятии источника зажигания. Если попытаться внести источник зажигания в зону, расположенную выше сечения IV–IV, устойчивого горения не будет. После удаления источника зажигания пламя погаснет.

Одним из факторов, препятствующих ликвидации пожаров газовых фонтанов, является высокая интенсивность теплового излучения факела пламени. Поэтому при атаке на газовый фонтан большое количество воды (до 500 л/с) тратится на орошение поверхности земли вокруг скважины в радиусе 10–15 м для снижения температуры в этой зоне, а также на защиту от теплового излучения личного состава и техники, принимающих участие в ликвидации пожара.

Интенсивность излучения компактного вертикального факела газового фонтана в безветренную погоду может быть рассчитана по формуле

$$q = \frac{fQ_{II}}{4\pi R^2}, \quad (5.5)$$

где  $f$  – коэффициент излучения факела пламени, учитывающий долю тепла, рассеивающегося излучением в окружающее пространство;  $Q_{II}$  – количество тепла, выделяемого факелом пламени;  $R$  – расстояние от центра пламени до рассматриваемой точки на поверхности земли.

Значение  $f$  принимается: для метана – 0,2, пропана – 0,33, других углеводородов – 0,4. В работе [21] установлена эмпи-

рическая зависимость коэффициента  $f$  от молекулярной массы углеводорода следующего вида:

$$f = 0,048\sqrt{M}, \quad (5.6)$$

где  $M$  - молекулярная масса углеводорода. Для практических целей с достаточной для практики точностью, можно пользоваться приближенной формулой  $f = 0,05\sqrt{M}$ .

Теплота пожара определяется по формуле

$$Q_{\Pi} = \beta Q_{\text{H}}^{\text{P}} V_{\Gamma}, \quad (5.7)$$

где  $Q_{\text{H}}^{\text{P}}$  - низшая теплота сгорания газа, Дж/м<sup>3</sup>;  $V_{\Gamma}$  - расход (дебит) газового фонтана, м<sup>3</sup>/ч;  $\beta$  - коэффициент неполноты сгорания.

Зная величину интенсивности теплового излучения, которую выдерживает личный состав  $q_{\text{безоп}}$ , можно рассчитать предельное расстояние (рис.5.4) от центра факела пламени по формуле

$$R = \left( \frac{fQ_{\Pi}}{4\pi q_{\text{безоп}}} \right)^{1/2}, \quad (5.8)$$

На рис.5.5 показана зависимость интенсивности теплового излучения от времени теплового воздействия при максимальных болевых ощущениях. Из графика видно, что с увеличением тепловых нагрузок время резко сокращается. При интенсивности излучения (3-4)  $10^7$  Дж/(м<sup>2</sup>·ч) время реакции человека (~5 с) оказывается больше, чем время достижения болевых ощущений, что может привести к сильным ожогам людей, находящихся вблизи устья потушенного фонтана при неожиданной его вспышке. При расчетах принимают, что тепловое излучение с интенсивностью в  $5,6 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>2</sup>·ч) является безопасным и личный состав может выдерживать такие тепловые нагрузки без специальной защиты в течение неограниченного времени.

Безопасное расстояние (рис.5.4), на котором может работать личный состав, рассчитывается по формуле

$$L_{\text{безоп}} = \left[ R^2 - \left( H + \frac{H_{\Phi}}{2} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (5.9)$$

Задаваясь величиной допустимого теплового воздействия, которое выдерживает личный состав ограниченное время, опре-

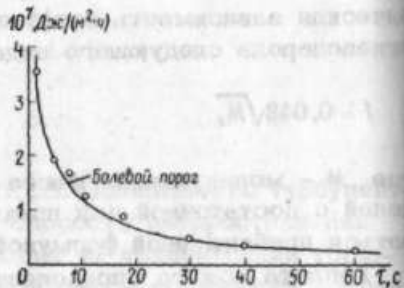
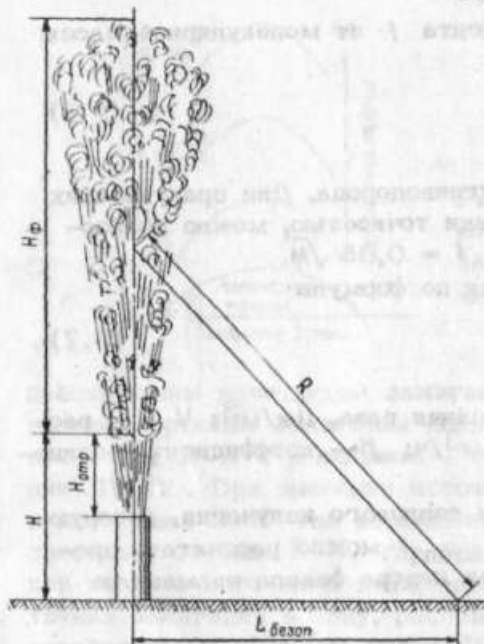


Рис.5.5. Зависимость интенсивности теплоизлучения от времени воздействия при максимальных болевых ощущениях

Рис.5.4. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния до горящего факела газового фонтана

делим предельное расстояние, на котором возможна работа в опасной зоне.

При сильном ветре пламя факела отклоняется от вертикального положения (рис.5.6), поэтому зона теплового воздействия будет иметь форму эллипса. В этом случае безопасное расстояние от устья скважины в противоположном направлении ветра увеличивается и может быть рассчитано по формуле

$$L_{\text{безоп}} = \left\{ R^2 - \left[ H + \left( \frac{H_{\phi}}{2} - H \right) \cos \theta \right]^2 \right\}^{1/2} + (x_M - H) \sin \theta, \quad (5.10)$$

где  $\theta$  - угол наклона факела пламени. Подставив в формулу (5.8) константы, а также преобразовав ее с помощью эмпирической зависимости, связывающей высоту факела пламени с дебитом скважины ( $H_{\phi} \rightarrow f(V)$ ), получим выражение для определения безопасного расстояния от высоты пламени газового фонтана вида:

$$R = \left( \frac{fQ_{\text{н}}^p V_{\text{г}}}{4\pi q_{\text{безоп}}} \right)^{1/2}, \quad (5.11)$$

где  $V_{\Gamma} = 16,7 (H_{\Phi})^{2,5}$  - экспериментальная эмпирическая зависимость,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $q_{\text{безоп}} = 5,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  - задались.  
Для метана принимаем:

$$f = 0,2; Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 3,6 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3$$

Получим:

$$R = \left[ \frac{0,2 \cdot 3,6 \cdot 10^7 \cdot 16,7 (H_{\Phi})^{2,5}}{4 \cdot 3,14 \cdot 5,6 \cdot 10^6} \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

или в окончательном виде:

$$R = 1,32 H_{\Phi}^{1,25}, \quad (5.13)$$

где  $H_{\Phi}$  - высота факела пламени, м.

Тогда безопасное расстояние до устья скважины, где может находиться личный состав неограниченное время без специальных защитных средств, определим по формуле

$$L_{\text{безоп}} = \left[ 1,75 H_{\Phi}^{2,5} - \left( H + \frac{H_{\Phi}}{2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5.14)$$

где  $H$  - расстояние от земли до нижней точки факела пламени, м.

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

Для ламинарного факела пламени, формирующегося на круглой трубе, тепловое напряжение может быть рассчитано по формуле

$$\left[ \frac{Q_{\text{II}}}{V} \right] = \frac{v_{\text{M}} F Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V} \quad (5.15)$$

Принимая приближенно форму пламени конической, определим ее объем и поверхность:

$$F = \pi R H_{\Phi} = \pi R \sqrt{R^2 + l^2}; \quad (5.16)$$

$$V = \frac{1}{3} \pi R^2 l, \quad (5.17)$$

где  $R$  - радиус горелки;  $l$  - длина образующей;  $H$  - высота факела.

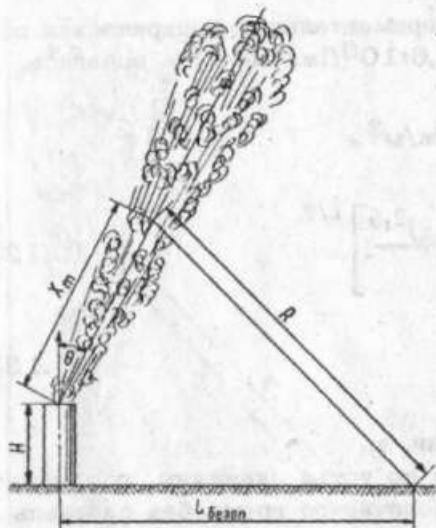


Рис.5.6. Принципиальная схема расчета безопасного расстояния для наклонного факела пламени

После преобразований и подстановки известных величин:

$$v_M = v_T \rho ; R = v_T r \quad \text{и} \quad (5.18)$$

$$l = v_{\Pi} r$$

формула теплового напряжения объема факела пламени примет вид:

$$\left[ \frac{Q_{\Pi}}{V} \right]_{\max} = \frac{3Q_{\Pi}^D v_T \rho \sqrt{v_{\Pi}^2 + v_T^2}}{RV} \quad (5.19)$$

Для двух горелок различных диаметров при одинаковой скорости смеси в них, считая нормальную скорость константой, тепловые напряжения объема факела обратно пропорциональны радиусу горелки:

$$\left[ \frac{Q_{\Pi}}{V} \right]_1 : \left[ \frac{Q_{\Pi}}{V} \right]_2 = R_2 : R_1 \quad (5.20)$$

Это объясняется тем, что горение смеси происходит по поверхности факела. С уменьшением радиуса горелки увеличивается поверхность пламени, приходящаяся на единицу объема факела, что приводит к увеличению теплового напряжения.

Такой вид горения наблюдается и на реальных пожарах при горении распыленных газовых фонтанов (рис.5.7), например, когда на устье скважины находится буровое оборудование или скважина оборудована фонтанной арматурой (елкой). Фронт пламени имеет развитую поверхность горения, что уменьшает инертный объем факела и увеличивает тепловое напряжение факела горения. При этом факел пламени имеет незначительную длину (высоту) и большой поперечный размер (ширину, диаметр). При встрече струи с фонтанной арматурой за плохо обтекаемыми телами образуется разрежение, вызывающее циркуляцию мощного потока высоконагретых продуктов горения. Факел горения

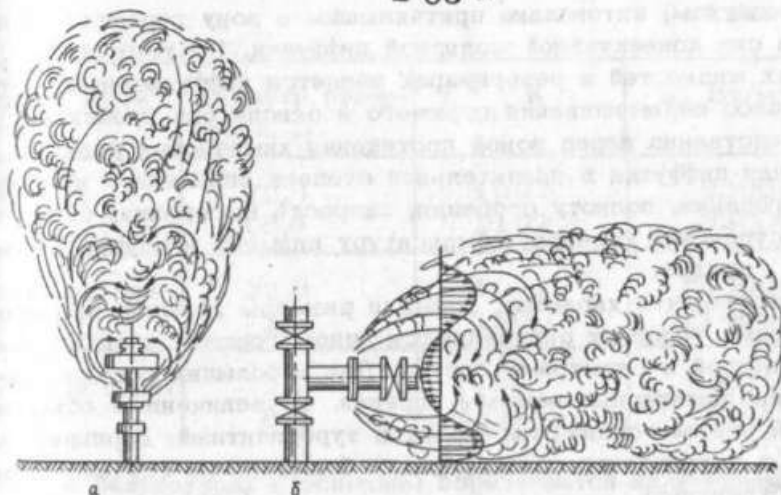


Рис.5.7. Виды факелов пламени распыленных газовых фонтанов  
а - вертикальный; б - горизонтальный

принимает вид полого расходящегося конуса, в котором зажигание осуществляется как изнутри, так и по наружной поверхности. Тушение мощных распыленных фонтанов значительно труднее, чем компактных. Из-за сильно развитой поверхности горения горение является более устойчивым. На практике распыленный фонтан часто приводят к компактному и только затем приступают к тушению. Кроме того, встречаются комбинированные фонтаны с компактным факелом вверху (или наклонным под углом к горизонту) и распыленным у устья (на арматуре), а также групповые фонтаны с одновременным горением двух и более скважин.

### § 5.3. Особенности пожаров в резервуарах с горючими жидкостями

Горение жидкости в резервуаре представляет собой горение паровоздушной смеси, образующейся над зеркалом горючей жидкости. Поток пара к зоне горения поступает непрерывно благодаря процессу испарения, который, в свою очередь, определяется интенсивностью лучистого теплового потока из зоны горения к зеркалу горючей жидкости. Кислород, необходимый для горения, поступает в зону горения из окружающей среды вмес-

те с воздухом, интенсивно притекающим в зону горения под действием сил конвективной молярной диффузии. Поэтому пламя горючих жидкостей в резервуарах является диффузионным, когда процесс перемешивания горючего и окислителя происходит непосредственно перед зоной протекания химических реакций. Молярная диффузия в значительной степени определяет интенсивность горения, полноту сгорания, скорость выгорания, скорость распространения горения, температуру пламени и другие параметры пожара.

Известно, что характер, форма и размеры пламени при прочих равных условиях определяются видом горючей жидкости, ее температурой и размерами сосуда. Для небольших сосудов характерны ламинарные режимы горения. С увеличением объемов сосудов режим горения переходит в турбулентный. Горение жидкостей в технических резервуарах в большинстве случаев бывает турбулентным.

Высота пламени горящего резервуара прямо пропорциональна его диаметру. Для турбулентных пламен резервуаров диаметром от 2 до 23 м относительная высота пламени может быть принята равной:

$$\begin{aligned} \text{для бензина} \quad H_{\text{пл}} &\approx 1,50 D_p; \\ \text{для дизельного топлива} \quad H_{\text{пл}} &\approx 1,0 D_p; \\ \text{для этилового спирта} \quad H_{\text{пл}} &\approx 0,8 D_p. \end{aligned}$$

На высоту факела пламени резервуара большое влияние оказывает скорость ветра. Ветер дополнительно интенсифицирует процесс горения за счет лучшего притока кислорода в зону горения.

При скорости ветра  $w_B > 1$  м/с относительное увеличение высоты пламени и отклонение его от вертикальной оси горючих жидкостей различно. При скорости ветра около 4 м/с и более отклонение факела пламени от вертикальной оси составляет 60-70°, т.е. пламя практически горизонтально.

При тушении горящих жидкостей с поверхности резервуаров необходимо знать температуру факела пламени и его лучистый тепловой поток. На температуру большое влияние оказывают турбулентные пульсации и метеорологические условия, поэтому она непрерывно изменяется. В табл. 5.2 приведены средние температуры и лучистые тепловые потоки факела пламени горящего резервуара с нефтепродуктами и этилового спирта при различных его диаметрах. Из табл. 5.2 видно, что с увеличением диаметра резервуара средняя температура факела пламени уменьшается, а лучистый тепловой поток возрастает.

Лучистый тепловой поток факела пламени при горении жид-



Горючие жидкости	Диаметр резервуара, м	$T_{пл}^{ср}$ , К	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
Бензин А-66	22,8	1097	83000
	18,6	1102	82000
Дизельное топливо	22,8	1022	63000
	2,7	1260	14600
Этиловый спирт	2,7	-	30100
	8,5	-	59000

костей в резервуарах в основном определяется излучением сажистых частиц и промежуточных продуктов разложения, которые присутствуют в пламени. Как известно, при горении жидкостей со свободной поверхности в большинстве случаев образуется светящееся пламя. Светимость пламени возникает в результате процесса разложения (пиролиза) паров ГЖ или ЛВЖ при их движении с поверхности зеркала к фронту горения. В результате этого возникают новые фазы – твердого сажистого углерода, жидких и твердых промежуточных углеводородных соединений.

Степень черноты пламени  $\epsilon_{пл}$  для большинства жидких углеводородных горючих веществ, при размерах резервуара  $D_p = 2,5$  м,  $\epsilon_{пл} = 0,9$ , а при  $D_p > 5$  м можно принимать  $\epsilon_{пл} = 1$ .

Зона теплового воздействия при пожаре в резервуаре определяется в большинстве случаев лучистым тепловым потоком. Поэтому необходимо знать, какую долю тепла составляет лучистый тепловой поток от общего количества тепла при горении паров жидкости над резервуаром. Рассмотрим пламя жидкости (рис.5.8), которая сгорает в резервуаре диаметром 5 м. Степень черноты пламени близка к единице, высота составляет  $\sim 1,2 D_p$ , а скорость выгорания почти не зависит от диаметра. Примем условно форму факела пламени над резервуаром конической. Поток тепла, излучаемого факелом пламени, определится соотношением:

$$q_{луч} = \epsilon_{пл} \sigma_0 T_{пл}^4 F_{пл} \quad (5.21)$$

или

$$q_{\text{луч}} = 2,6\pi R^2 \sigma_0 T_{\text{пл}}^4,$$

где  $R$  - радиус резервуара, м;  $\sigma_0$  - коэффициент излучения черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{пл}}$  - температура пламени, К.

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

$$q_{\text{выд}} = \pi R^2 v_0 \beta \rho Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (5.22)$$

где  $v_0$  - линейная скорость выгорания ГЖ, м/с;  $\rho$  - плотность ГЖ, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  - коэффициент химического недожога;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  - теплотворная способность ГЖ, кДж/кг.

Поделив  $q_{\text{луч}}$  на  $q_{\text{выд}}$ , получим:

$$\frac{q_{\text{луч}}}{q_{\text{выд}}} = \frac{2,6\sigma_0 T_{\text{пл}}^4}{\beta v_0 \rho Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \quad (5.23)$$

Для большинства углеводородных горючих жидкостей это отношение равно 0,4-0,5. Зная общую потерю тепла за счет излучения пламени, можно рассчитать количество тепла, излучаемого в направлении зеркала жидкости, а если пренебречь количеством тепла, передаваемого жидкости через стенки резервуара, то и общее количество тепла, идущего на поддержание непрерывного процесса горения жидкости над резервуаром, т.е. на испарение горючей жидкости.

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

$$H = Kt^n, \quad (5.24)$$

где  $H$  - уровень ГЖ в резервуаре, м;  $K$  - коэффициент пропорциональности;  $t$  - время, с;  $n$  - показатель степени, колеблющийся от 0,55 до 0,75.

Уменьшение скорости выгорания обусловлено тем, что с увеличением расстояния до зоны горения понижается градиент концентрации паров жидкости.

После воспламенения температура на поверхности жидкости быстро возрастает, достигая определенного значения. Для химически чистых, однородных жидкостей она очень близка к температуре кипения, но всегда несколько ниже нее. Для неоднород-

Рис.5.8. Форма пламени над горящим резервуаром



родных нефтепродуктов температура поверхностного слоя всегда несколько выше  $t_{кип}$  данной жидкости. Это обусловлено тем, что при горении полифракционных нефтепродуктов в поверхностном слое всегда происходит "разгонка" жидкостей с выходом более летучих фракций. Поэтому  $t_{пов} \geq t_{кип}$ .

Поле температур в слое ГЖ по его толщине и в горизонтальной плоскости неравномерно как по координатам  $x, y, z$ , так и по времени.

Экспериментально установлено, что при горении жидкостей распределение температур по толщине может быть двух типов. В одном случае передача тепла с поверхности жидкости в глубину осуществляется теплопроводностью, что приводит к прогреву жидкости на небольшую глубину (2-5 см). Температура в прогретом слое быстро понижается с увеличением расстояния от поверхности жидкости (рис.5.9). Величина прогретого слоя остается постоянной и не изменяется по мере выгорания жидкости. Первый тип распределения температур в горячей жидкости выражается соотношением:

$$t - t_0 = (t_{п} - t_0) e^{-K\delta},$$

где  $t_0$  и  $t_{п}$  - соответственно начальная температура и температура на поверхности жидкости, °С;  $t$  - температура жидкости на расстоянии  $\delta$  от поверхности, °С;  $K$  - коэффициент пропорциональности;  $\delta$  - расстояние от поверхности жидкости, см.

При горении жидкостей в резервуарах большого диаметра характер прогрева существенно отличается от первого. При горении возникает прогретый слой, толщина которого растет во времени, а температура в этом слое почти одинакова с температурой на поверхности жидкости (рис.5.10). Такой слой называют гомотермическим. Под гомотермическим слоем температура жидкости быстро падает до начальной. Изменение толщины гомотермического слоя во времени описывается уравнением следующего вида:

$$\delta = \delta_T (1 - e^{-\mu t}),$$

где  $\delta$  - толщина гомотермического слоя, см;  $\delta_T$  - толщина прогретого слоя, см;  $t$  - время от начала формирования слоя, мин;  $\mu$  - коэффициент пропорциональности.

Распределение второго типа может наблюдаться при определенных условиях (характеризующих интенсивность прогрева сте-

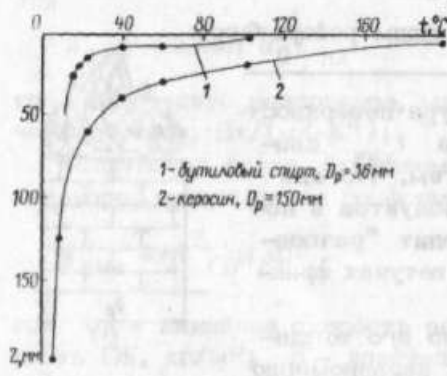


Рис.5.9. Распределение температуры по толщине слоя горячей жидкости в установившемся режиме

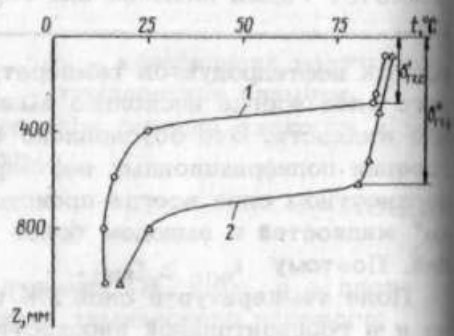


Рис.5.10. Распределение температуры по толщине слоя горячего бензина во времени ( $d_p = 130 \text{ см}$ ): 1 - через 20 мин; 2 - через 40 мин

нок резервуара) у всех нефтепродуктов и даже у индивидуальных жидкостей. Но чаще всего такое распределение наблюдается при горении бензина, влажных нефтей, масел и мазутов. Распределение первого типа характерно для горения керосина, трансформаторного и солярового масел, дизельного топлива и других жидкостей с высокой температурой кипения. При их горении температура стенки резервуара чаще всего не превышает температуры кипения, поэтому не возникает интенсивных конвективных токов, а следовательно, и быстрого прогрева жидкостей вглубь.

Если при горении любых жидкостей охладить стенки резервуара, то гомотермического слоя не возникает, так как прогрев вглубь осуществляется в основном теплопроводностью.

Прямым следствием образования гомотермического слоя при горении некоторых видов горючих жидкостей является выброс их из резервуара. Он обусловлен вскипанием перегретых слоев воды, расположенных под гомотермическим слоем горючей жидкости. Выброс происходит в тот момент, когда толщина слоя достигает уровня воды. Это явление приводит к резкому увеличению площади пожара, интенсификации его распространения и развития. Кроме того, это явление представляет большую опасность для личного состава.

Кроме явления выброса, при определенных условиях может наблюдаться вскипание нефтепродуктов. К вскипанию способны все нефтепродукты, имеющие воду и прогревающиеся при горе-

ни выше  $100^{\circ}\text{C}$ . В процессе прогрева нефтепродукта влага, находящаяся в верхних слоях, частично опускается в нижележащие и постепенно на Границе прогретых и холодных слоев накапливается слой с повышенным содержанием влаги. Когда температура обводненного слоя повышается до  $100^{\circ}\text{C}$  и выше, начинается парообразование. Пузырьки водяного пара, двигаясь вверх, вспенивают нефтепродукт, объем его увеличивается, и если высота сухого борта невелика, то горящий вспененный нефтепродукт переливается через борт резервуара.

#### § 5.4. Открытые пожары, связанные с горением твердых горючих материалов

К открытым пожарам, связанным с горением твердых горючих материалов, относятся: пожары на складах лесоматериалов, лесные пожары, пожары торфополей, а также пожары хлебных массивов и степные пожары.

Пожары на складах лесоматериалов. Как и все открытые пожары, пожары на складах лесоматериалов характерны отсутствием ограничений газообмена и своеобразием параметров зон пожара. Особенностью этих пожаров от газонефтяных фонтанов и резервуаров с ЛВЖ, ГЖ является большая скорость их распространения, особенно при наличии ветра, а также распространение пожара на значительные расстояния вследствие разлета искр и головней, переносимых мощными конвективными потоками, возникающими в результате образования аэродинамического вихря в зоне горения.

Характерной особенностью пожаров на складах лесоматериалов является большой объем зоны горения, что обусловлено значительным объемом продуктов термического разложения, выделяющихся с сильно развитой поверхности горючего материала. Сгорая, эти вещества образуют большое количество нагретых продуктов горения, поднимающихся вверх. Вследствие этого формируются мощные потоки нагретых продуктов горения и свежего воздуха, приводящие к созданию локальной аэродинамической обстановки, практически не зависящей от метеорологических условий. Аэродинамические потоки увлекают за собой горящие доски и другие предметы, способные привести к возникновению новых очагов пожаров, как правило, на большом расстоянии от основной зоны горения (до нескольких сотен метров).

Анализ имевших место пожаров и результаты экспериментальных исследований показывают, что средняя линейная скорость распространения фронта пламени на складах лесоматериалов изменяется в широких пределах от 0,1 до 4 м/мин, а в

некоторых случаях достигает 10 м/мин и более. Скорость распространения огня зависит, во-первых, от размеров материалов и изделий, а во-вторых, от их влажности. Как известно, ассортимент лесоматериалов, хранящихся на складах, достаточно широк: от щепы и древесных отходов, имеющих минимальные размеры 1 мм, до круглого леса с наименьшим размером бревен 10 см и более.

Горение распространяется по горючему материалу тогда, когда температура материала достигает температуры воспламенения, т.е. той температуры, при которой состав и количество выделяющихся продуктов разложения обеспечивают образование горючей смеси их с воздухом. То есть время распространения пламени на данный участок поверхности, а следовательно, и скорость распространения пламени определяются временем прогрева поверхностного слоя материала до температуры воспламенения.

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

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

В натуральных условиях скорость распространения пламени по штабелям из досок толщиной 25 мм в 2-2,5 раза выше, чем по штабелям из досок толщиной 50 мм.

Большое влияние на скорость распространения пламени оказывает влажность древесины. Во-первых, повышается теплоемкость влажного материала, следовательно, увеличиваются затраты тепла на его нагрев; во-вторых, требуются дополнительные затраты тепла на испарение влаги; в-третьих, увеличивается теплопроводность материала, что вызывает дополнительные потери тепла на прогрев материала, и т.п.

Зависимость безразмерной скорости распространения пламени по штабелям пиломатериалов от их влажности показана на рис. 5.11. Из графика видно, что увеличение влажности материала с 11 до 28% приводит к снижению скорости распространения пламени в 4 раза.

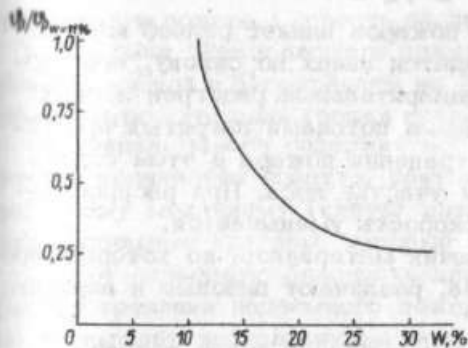


Рис.5.11. Зависимость скорости распространения пламени по штабелям пиломатериалов от их влажности

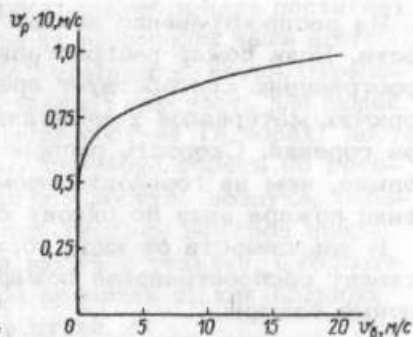


Рис.5.12. Зависимость скорости распространения пламени от скорости ветра

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

$$v_p = v_{p0} \left[ 1 + 0,14 \left( \frac{v_v}{v_{p0}} \right)^{0,32} \right],$$

где  $v_{p0}$  – скорость распространения пламени по штабелям при отсутствии ветра, м/с;  $v_v$  – скорость ветра, м/с.

Из графика (рис.5.12) видно, что при увеличении скорости ветра до 20 м/с происходит возрастание скорости распространения пламени почти в 2 раза, причем интенсивность нарастания скорости распространения пламени снижается с увеличением скорости ветра.

Пожары на складах лесоматериалов, особенно пиломатериалов, характеризуются высокими скоростями выгорания. Это связано прежде всего с тем, что штабеля, в которых хранятся пиломатериалы, обладают сильно развитой поверхностью горения. Поэтому приведенная массовая скорость выгорания (с единицы площади пожара) может составлять при горении штабелей несколько десятков килограммов с  $1 \text{ м}^2$  пожара в минуту

**Лесные пожары.** Вероятность возникновения и распространения лесных пожаров существенно возрастает в сухую жаркую погоду, когда происходит не только подсушивание, но и предварительный разогрев горючих материалов. Скорость распространения огня днем больше, чем ночью. В ночное время, кроме охлаждения материала за счет снижения температуры окружающей среды, происходит увеличение равновесной влажности горючих материалов.

На распространение лесных пожаров влияет рельеф местности. Если пожар распространяется вверх по склону, его распространению способствует предварительный разогрев лесных горючих материалов конвективными потоками нагретых продуктов горения. Скорость распространения пожара в этом случае больше, чем на горизонтальном участке леса. При распространении пожара вниз по склону скорость уменьшается.

В зависимости от вида горючих материалов, по которым происходит распространение пожара, различают низовые и верховые лесные пожары.

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

При низкой влажности горючих материалов подстилки и живого покрова, а также при их большом количестве низовой пожар может видоизменяться в верховой, когда распространение пламенного горения происходит по кронам деревьев. Этот вид пожаров является наиболее губительным для лесных массивов.

При благоприятных погодных и рельефных условиях скорость распространения верховых пожаров может достигать 25 км/час. Быстрому развитию лесных верховых пожаров способствует ветер, достигающий 6-12 м/с. Другим фактором, способствующим быстрому увеличению площади лесных пожаров, является создание мощной конвекционной колонки (высотой до 5 км), за счет которой на высоту свыше 1 км поднимаются горящие угли. Выпадая на еще негорящие участки леса, они образуют новые очаги пожаров, которые затем сливаются с основной зоной горения.

**Торфяные пожары.** Торф в естественных условиях не способен к самостоятельному горению из-за значительной равновесной влажности. Однако при длительном сохранении жаркой засушливой погоды создаются условия для возникновения торфяных пожаров даже на неосушенных полях. Залежи торфа, подготовленные к разработке (осушенные), способны гореть даже весной. Особенно опасными с точки зрения возникновения и распространения пожара являются караваны, а также торфополя на предприятиях фрезерной добычи, где торфяная масса перерабатывается в мелкую крошку, а затем высушивается.

На скорость распространения пожара большое влияние оказывает скорость ветра. Так, при скорости ветра 10 м/с и более горящая крошка легко поднимается воздушными потоками и переносится на значительные расстояния (до 50 м), образуя



новые очаги пожара. Скорость распространения пожара достигает 20-25 м/мин. Форма площади пожара на торфополях чаще всего бывает угловой с расширением ее по направлению ветра. Переносимая ветром горящая крошка представляет опасность для людей.

Торфяная масса содержит в своем составе (в порах) достаточное количество воздуха, поэтому способна гореть по гетерогенному механизму (тлеть) даже без доступа воздуха, образуя подземные прогары, которые при тушении пожаров представляют серьезную опасность для людей и техники. Скорость распространения подземного пожара невелика и, как правило, не превышает нескольких метров в сутки.

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

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

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

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

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ВНУТРЕННИХ  
ПОЖАРОВ

## § 6.1. Понятие динамики пожаров

Под динамикой пожара понимается изменение основных параметров пожара во времени и пространстве. Поэтому необходимо изучить законы изменения параметров пожара во времени и пространстве. О характере пожара можно судить по совокупности большого числа его параметров: по площади пожара, по температуре пожара, скорости его распространения, интенсивности тепловыделения, интенсивности газообмена, скорости выгорания пожарной нагрузки, интенсивности задымления и плотности дыма и т.д. Обычно при исследовании сложных процессов и явлений выделяют первичные, определяющие параметры, и вторичные, т.е. производные от них. При исследовании пожаров это сделать почти невозможно.

Во-первых, потому что практически невозможно определить, что в этой сложной совокупности процессов и явлений следует считать первичным, а что вторичным, производным (тепловыделение определяет газообмен, или, наоборот, тепловыделение есть функция газообмена в зоне горения и т.д.).

Во-вторых, потому что многие параметры пожара становятся первичными или производными в зависимости от цели исследования, от позиции исследователя.

В-третьих, не всегда первичные, наиболее важные по своей физической сущности процессы, являются определяющими с точки зрения исследователя пожара.

Так, например, с точки зрения физической сущности процесса горения на пожаре интенсивность газообмена является одним из основных параметров. Но с точки зрения динамики пожара его можно почти не рассматривать. Можно рассматривать лишь его следствие – интенсификацию процесса горения, рост скорости распространения пожара и скорости выгорания пожарной нагрузки, а уже как следствие этого – скорость роста температуры пожара и т.д.

Поэтому в качестве основных параметров, изменяемых во времени, для изучения динамики пожара примем: площадь пожара, температуру пожара и интенсивность задымления на пожаре.

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

Качественно анализ некоторых параметров пожара и их изменение во времени частично рассмотрены в гл. 4. Проследим изменение параметров пожара во времени и в пространстве с момента загорания до выхода их на стационарный режим, в случае свободного развития пожара (без тушения).

Рассмотрим наиболее общий случай развития пожара в здании с горением равномерно распределенных по поверхности пола твердых горючих материалов, внутри помещения обычного типа\* с начальной температурой среды  $20^{\circ}\text{C}$ . Большинство пожаров, связанных с горением ТГМ (кроме некоторых частных случаев, когда пожар является следствием взрыва или умышленного поджога), начинается, как правило, с возникновения открытого пламенного горения или тления на сравнительно небольшом участке. Пламя, возникшее от постороннего источника зажигания, медленно распространяется по поверхности горючего материала (рис. 6.1). Вокруг зоны горения сразу возникнет конвективный газовый поток, обеспечивающий необходимый газообмен. Поверхность горючего материала под зоной горения и перед ней начнет прогреваться на большую глубину. Интенсивность выделения летучих фракций и продуктов пиролиза ТГМ повысится. Размер факела пламени увеличится в объеме, продолжая распространяться и по поверхности горючего материала на те зоны, где поверхностный слой материала прогрелся до температуры, равной или выше температуры его воспламенения. Одновременно интенсифицируется конвективный газовый поток вокруг факела пламени больших размеров и вместе с тем растет, интенсифицируется лучистый поток тепла из зоны горения в окружающее пространство, в том числе и к поверхности горючего материала. Эта первая фаза пожара, точнее, перехода загорания в пожар, длится  $1 \div 3$  мин (рис. 6.1).

Затем начинается этап развития пожара. Вступает в действие новый фактор — медленное повышение температуры среды в помещении (II фаза пожара). Весь описанный выше процесс повторяется, но уже с большей интенсивностью: быст-

\* Под помещением обычного типа понимается помещение малых размеров, с высотой потолка  $3 < H < 6$  м, площадью  $F_{\text{п}} = 20 \div 30 \text{ м}^2$ , с отношением  $\frac{F_1}{F_{\text{п}}} = 1/10$ , с пожарной нагрузкой типа древесины,

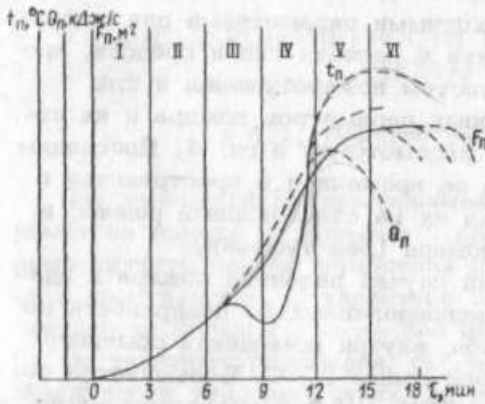


Рис. 6.1. Изменение основных параметров пожара во времени

рее прогревается вглубь "горящий" слой древесины на большей площади, соответственно интенсивнее выделяются летучие фракции горючих материалов. Быстрее растет объем зоны горения, еще интенсивнее конвективный тепловой, газовый и лучистый потоки, увеличивается площадь пожара, в том числе и за счет увеличения скорости распространения пожара, круче растет температура в помещении. Этот второй этап длится примерно

5-10 мин. Начинается III этап пожара - бурный процесс нарастания всех рассмотренных выше параметров. Температура в помещении поднимается до 250 - 300°C. Начинается так называемая стадия объемного развития пожара, когда пламя заполняет практически весь объем помещения, а процесс распространения пламени происходит уже не по поверхности твердых горючих материалов, а дистанционно, через разрывы пожарной нагрузки, под действием конвективных и лучистых потоков тепла воспламеняются отдельно стоящие от зоны горения предметы и горючие материалы.

Начинается "объемная фаза" развития пожара и фаза объемного распространения пожара. При температуре газовой среды в помещении 300°C происходит разрушение остекления. Догорание продуктов сгорания может при этом происходить и за пределами помещения (огонь вырывается из проемов наружу). Скачком изменяется интенсивность газообмена: она резко возрастает, интенсифицируется процесс оттока горячих продуктов горения и приток свежего воздуха в зону горения (IV этап пожара). При этом температура в помещении может кратковременно несколько снизиться. Но в соответствии с изменением условий газообмена резко возрастают такие параметры пожара, как полнота сгорания, скорость выгорания и скорость распространения процесса горения. Соответственно резко возрастает удельное и общее тепловыделение на пожаре. Температура, несколько снизившаяся в момент разрушения остекле-

нии из-за притока холодного воздуха, резко возрастает, достигая  $500 - 600^{\circ}\text{C}$ . Процесс развития пожара бурно интенсифицируется, увеличивается численное значение всех параметров пожара, рассмотренных выше. Площадь пожара, среднеобъемная температура в помещении ( $800 - 900^{\circ}\text{C}$ ), интенсивность выгорания пожарной нагрузки и степень задымления достигают максимума.

Параметры пожара стабилизируются. Эта V фаза наступает обычно на 20 - 25 мин и длится в зависимости от величины и характера пожарной нагрузки еще 20 - 30 мин и более.

Затем (при условии свободного развития пожара) начинает постепенно наступать VI фаза пожара, характерная постепенным снижением его интенсивности, так как основная часть пожарной нагрузки уже выгорела.

Толщина обугленного слоя на поверхности горючего материала, составляющая 5 - 10 мм, препятствует дальнейшему проникновению тепла вглубь и выходу летучих фракций из горючего материала. Кроме того, наиболее летучие фракции под действием высокой средней температуры в помещении уже выделились. Интенсивность их поступления в зону горения снижается. Верхний слой угля начинает гореть беспламенным горением по механизму гетерогенного окисления, поглощая значительную часть кислорода воздуха, поступающего в зону горения. В помещении накопилось большое количество продуктов горения. Среднеобъемная концентрация кислорода в помещении снизилась до 16 - 17%, а концентрация продуктов горения, препятствующих интенсивному горению, возросла до предельного значения. Интенсивность лучистого переноса тепла к горючему материалу уменьшилась и из-за снижения температуры в зоне горения, и из-за повышения оптической плотности среды. Из-за большого задымления она стала менее прозрачной даже для теплового излучения.

Интенсивность горения медленно снижается, что влечет за собой понижение всех остальных параметров пожара (вплоть до площади горения). Площадь пожара не сокращается, она может расти или стабилизироваться, а площадь горения сокращается. Наступает VII стадия пожара - догорание в виде медленного тления, после чего через некоторое, иногда весьма продолжительное время, пожар догорает и прекращается. В настоящее время большинство объектов оборудуются автоматическими системами пожарной сигнализации и тушения пожара. Автоматические системы пожарной сигнализации должны сработать на I стадии развития пожара. Автоматические сис-

темы тушения пожара должны включаться на I или II фазе его развития. В этой фазе пожар еще не достиг максимальной интенсивности развития. Тушение пожара передвижными средствами начинается, как правило, через 10-15 мин после извещения о пожаре, т.е. через 15-20 мин после его возникновения (3-5 мин до срабатывания системы сигнализации о пожаре; 5-10 мин-следование на пожар; 3-5 мин разведка и боевое развертывание), рис. 6.1. То есть тактические боевые действия, как правило, начинаются на III-IV фазе, а иногда и на V фазе его развития, когда параметры пожара достигли наибольшей интенсивности своего развития или максимального значения.

Рассмотрим количественно некоторые основные параметры пожара, определяющие динамику его развития. Определим интенсивность тепловыделения на пожаре как одного из основных параметров процесса горения:

$$Q_{\Pi} = \beta Q_{\Pi}^P v_{\Pi}^{\prime} F_{\Pi}^{\prime} \quad (6.1)$$

В это выражение входят две переменные величины  $v_{\Pi}^{\prime}$  и  $F_{\Pi}^{\prime}$ , зависящие от времени развития пожара, температуры<sup>М</sup> пожара, интенсивности газообмена и других параметров. Приведенную массовую скорость выгорания определим по формуле

$$v_{\Pi}^{\prime} = (aT_{\Pi} + bI_{\Gamma}) v_{M_0}^{\prime} \quad (6.2)$$

где  $a, b$  - эмпирические коэффициенты;  $v_{M_0}^{\prime}$  - приведенная массовая скорость выгорания пожарной нагрузки для данного вида горючего материала;  $T_{\Pi}$  - среднее значение температуры пожара;  $I_{\Gamma}$  - интенсивность газообмена.

Скорость выгорания полимерных горючих материалов можно определить по формуле:

$$\lg v_{M_0}^{\prime} = a \lg C_{O_2}; \quad a = 3,175$$

как функцию концентрации кислорода в воздухе [40]; или по формуле

$$v_{M_0}^{\prime} = \frac{A}{T_{кп} - T_v} - B \quad (6.3)$$

как функцию температуры самого ТГМ [40], где  $A$  и  $B$  - константы;  $T_v$  - температура, при которой скорость горения

резко возрастает, °C;  $T_{кр}$  - температура, при которой скорость горения достигает значения  $v_M^{max}$ , °C.

Зависимость площади пожара от основных параметров его развития примет вид:

$$F_{II} = k (v_p t)^n, \quad (6.4)$$

где  $k$  и  $n$  - коэффициенты, зависящие от геометрической формы площади пожара;  $v_p, t$  - соответственно линейная скорость распространения пожара и время его свободного развития.

Определим скорость роста площади пожара во времени  $F_{II} = f(t)$ . Сначала найдем численные значения постоянных величин, входящих в формулу для  $F_{II}$ , а затем определим выражения для переменных, зависящих от времени.

Например, для пожара круговой формы при равномерном распределении пожарной нагрузки на площади пола помещения и отсутствии интенсивно направленных потоков воздуха, влияющих на величину и направление распространения пожара,

$$k = \pi, \quad n = 2.$$

Для пожара, возникающего при тех же условиях у несгораемой вертикальной стенки или у края расположения пожарной нагрузки (при форме площади пожара, соответствующей полукругу),

$$k = \frac{\pi}{2}, \quad n = 2.$$

Для прямоугольной площади пожара, распространяющегося в обе стороны, при тех же начальных условиях  $k = 2a$ ;  $n = 1$ , где  $a$  - ширина фронта распространения пожара.

Линейная скорость распространения пожара, входящая в формулу  $F_{II}$ , - величина переменная во времени и зависит от вида горючего, средней температуры пожара и интенсивности газообмена:

$$v_p = (a_1 T_p + b_1 I_r) v_{p_0}, \quad (6.5)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  - эмпирические коэффициенты, устанавливающие зависимость линейной скорости распространения пожара от средней температуры и интенсивности газообмена, численное значение которых определяется опытным путем для каждого конкретного вида горючего;  $v_{p_0}$  - линейная скорость распространения горения для данного вида горючего.

Качественно характер зависимостей  $v_p = f(I_r)$ , выраженный через скорость воздушного потока над поверхностью горения, и  $V_p = f(t_{r,m})$ , полученные экспериментально для некоторых видов ТГМ, показаны на рис. 2,5 и 2,8. В уравнения (6.2) и (6.5) входят такие параметры, как средняя температура пожара  $T_{п}$  и интенсивность газообмена  $I_r$ . По мере развития пожара эти параметры будут расти, увеличивая линейную скорость распространения горения и приведенную массовую скорость выгорания.

### § 6.2. Тепловой режим пожара

Выделяющееся при горении тепло является основной причиной развития пожара и возникновения многих сопровождающих его явлений. Это тепло вызывает нагрев окружающих зону горения горючих и негорючих материалов. При этом горючие материалы подготавливаются к горению и затем воспламеняются, а негорючие разлагаются, плавятся, строительные конструкции деформируются и теряют прочность. Тепловыделение на пожаре сопровождается также движением газовых потоков и задымлением определенного объема пространства около зоны горения.

Возникновение и скорость протекания тепловых процессов зависит от интенсивности тепловыделения в зоне горения, т.е. от теплоты пожара. Количественной характеристикой изменения тепловыделения на пожаре в зависимости от различных условий горения служит температурный режим. Под температурным режимом пожара понимают изменение температуры во времени.

Определение температуры пожара как экспериментально, так и расчетом чрезвычайно сложно. Для инженерных расчетов, при решении ряда практических задач температуру пожара определяют из уравнения теплового баланса. Баланс тепла на пожаре составляется не только для определения температуры пожара, но и для выявления количественного распределения тепловой энергии. В общем случае тепловой баланс пожара для данного момента времени может быть представлен следующим образом:

$$Q_{п} = Q_{п,г} + Q_{к} + Q_{л} + Q_{н} \quad (6.6)$$

где  $Q_{п}$  — тепло, выделяющееся на пожаре, кДж;  $Q_{п,г}$  — тепло,



содержащееся в продуктах горения, кДж;  $Q_K$  - тепло, передаваемое из зоны горения конвекцией воздуху, омывающему зону, но не участвующему в горении, кДж,

$$Q_K = aF_{II} \Delta T;$$

$Q_{\text{л}}$  - тепло, передаваемое из зоны горения излучением,

$$Q_{\text{л}} = \sigma_0 \epsilon T_{\Gamma}^4 F_{II}.$$

Для открытых пожаров установлено, что доля тепла, передаваемого из зоны горения излучением и конвекцией, составляет 40-50% от  $Q_{II}$ . Оставшаяся доля тепла (60-70% от  $Q_{II}$ ) идет на нагрев продуктов горения. Таким образом, 60-70% от теоретической температуры горения данного горючего материала дадут приближенное значение температуры пламени. Температура открытых пожаров зависит от теплотворной способности горючих материалов, скорости их выгорания и метеорологических условий. В среднем максимальная температура открытого пожара для горючих газов составляет 1200-1350°C, для жидкостей 1100-1300°C и для твердых горючих материалов органического происхождения 1100-1250°C.

При внутреннем пожаре на температуру влияет больше факторов: вид горючего материала, величина пожарной нагрузки и ее расположение, площадь горения, размеры здания (площадь пола, высота помещений и т.д.) и интенсивность газообмена (размеры и расположение проемов). Рассмотрим подробнее влияние перечисленных факторов.

Кривая изменения температуры внутреннего пожара во времени показана на рис. 6.2. Всю продолжительность пожара можно разделить на три характерных периода по изменению температуры. Начальный период, соответствующий периоду роста пожара, характеризуется сравнительно невысокой среднеобъемной температурой.

Основной период, в течение которого сгорает 70-80% общей нагрузки горючих материалов. Окончание основного периода соответствует моменту, когда среднеобъемная температура достигает наибольшего значения или уменьшается не более, чем до 80% от максимального значения.

Заключительный период характеризуется убыванием температуры вследствие выгорания пожарной нагрузки. Поскольку скорость роста и абсолютное значение температуры пожара в каждом конкретном случае имеют свои характерные значения

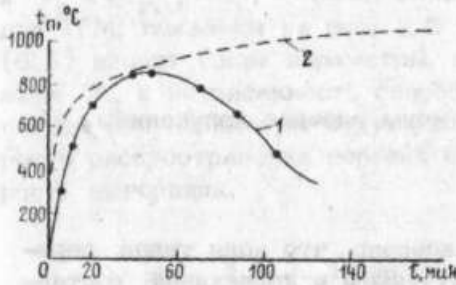


Рис. 6.2.

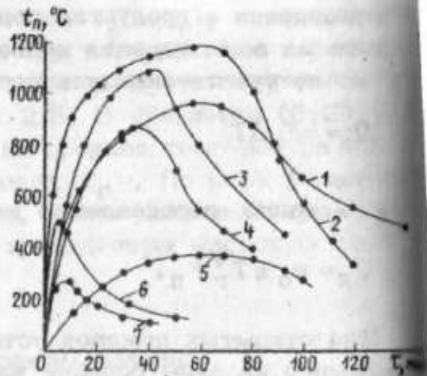


Рис. 6.3.

Рис. 6.2. Изменение температуры внутреннего пожара во времени: 1 – кривая конкретного пожара; 2 – стандартная кривая

Рис. 6.3. Изменение температуры внутреннего пожара в зависимости от вида горючего материала и величины пожарной нагрузки ( $F_{\text{пр}}/F_{\text{пола}} = 0,16$ ): 1 – резина, 100 кг/м<sup>2</sup>; 2 – древесина, 100 кг/м<sup>2</sup>; 3 – каучук, 50 кг/м<sup>2</sup>; 4 – резина, 50 кг/м<sup>2</sup>; 5 – древесина, 50 кг/м<sup>2</sup>; 6 – фенопласты, 50 кг/м<sup>2</sup>; 7 – бумага, 50 кг/м<sup>2</sup>

и особенности, введено понятие стандартной температурной кривой (рис. 6.2), обобщающей наиболее характерные особенности изменения температуры внутренних пожаров. Стандартная температурная кривая описывается уравнением:

$$t_{\text{п}}^{\text{СТ}} = 345 \lg(8r + 1) \quad (6.7)$$

или

$$t_{\text{п}}^{\text{СТ}} = 500 r^{0,15} \quad (6.8)$$

На рис. 6.3 показана зависимость температуры пожара от вида горючего материала и величины пожарной нагрузки при определенных условиях газообмена. Из графика видно, что с увеличением пожарной нагрузки время достижения максимальной температуры возрастает.

Температура пожара является функцией его остальных па-

ранитров и, в частности, интенсивности газообмена. Интенсивность газообмена внутреннего пожара определяется, с одной стороны, конструктивными особенностями здания: высотой проема ( $H_{пр}$ ) или площадью оконных проемов ( $F_{пр}$ ) и их расположением, площадью пола помещения ( $F_{пола}$ ), высотой помещения ( $H_{п}$ ), а с другой стороны, - размерами самого пожара, в частности, его площадью ( $F_{п}$ ). Соотношение между ними и площадью пожара ( $F_{п}/F_{пола}$ ;  $F_{пр}/F_{п}$ ;  $F_{пр}/F_{пола}$ ) определяют скорость роста и абсолютное значение массовой скорости выгорания, полноту горения и, следовательно, температуру пожара. Массовая скорость выгорания горючих материалов в условиях внутреннего пожара повышается с увеличением интенсивности газообмена, а затем некоторое время остается постоянной. Однако зависимость абсолютного значения температуры от интенсивности газообмена имеет другой вид. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Воздух, поступающий при газообмене в помещение, разделяется как бы на две части. Одна часть воздуха активно поддерживает и интенсифицирует процесс горения, другая часть вовлекается в движение внутренними конвективными токами и в зону горения не поступает. Последняя будет разбавлять продукты горения в объеме помещения и тем самым снижать их температуру. Количество воздуха, не участвующего в процессе горения, учитывается коэффициентом избытка воздуха для объема данного помещения.

На рис. 6.4 приведена зависимость температуры пожара от газообмена параметров проема, определяющих  $F_{пр} \sqrt{H_{пр}}$ . Из графика видно, что приток воздуха в помещение, где происходит пожар, увеличивает температуру его при неизменной площади пола и величине пожарной нагрузки. При условиях газообмена, близких к открытым пожарам, когда массовая скорость выгорания не зависит от размеров проемов, температура пожара достигает максимума и почти такая же, как при открытом пожаре.

Влияние отношений  $F_{п}/F_{п}$  и  $F_{п}/F_{пола}$  на температуру пожара показано на рис. 6.5. Из графика видно, что увеличение отношения  $F_{п}/F_{п}$  ведет к увеличению скорости роста температуры и ее максимума, а уменьшение этого отношения резко увеличивает продолжительность пожара. Кроме того, кривые 1, 2, 3, 4, 5 отражают изменение температуры пожара при отношении  $\frac{F_{п}}{F_{пола}} = 1$ , а кривая 6 - при отношении  $\frac{F_{п}}{F_{пола}} = 0,25$ , что свидетельствует о значительном влиянии

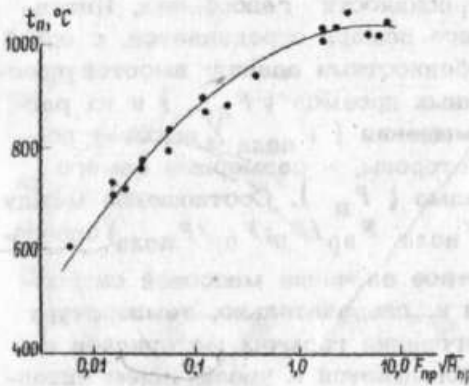


Рис. 6.4

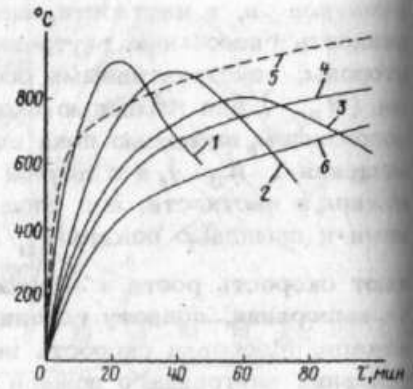


Рис. 6.5

Рис. 6.4. Влияние газообмена на температуру внутреннего пожара

Рис. 6.5. Изменение температуры внутреннего пожара в зависимости от  $F_1/F_{II}$  и  $F_{II}/F_{\text{пола}}$ : 1 -  $F_1/F_{II} = 1/5$ ; 2 -  $F_1/F_{II} = 1/7$ ; 3, 4, 5 -  $F_1/F_{II} = 1/10$ ; 6 - стандартная кривая

величины отношения  $F_{II}/F_{\text{пола}}$  на температурный режим пожара. Кривые 4 и 6 получены при пожарной нагрузке  $150 \text{ кг/м}^2$ , а кривая 3 - при значительно большей нагрузке.

Существенное влияние на температурный режим пожара оказывает высота помещения. На рис. 6.6 приведен график изменения температуры пожара в помещениях различной высоты, из которого следует, что в высоких помещениях скорость роста температуры выше, а максимальное значение температуры меньше, чем в помещениях малой высоты. Это объясняется тем, что во втором случае коэффициент избытка воздуха выше, чем в первом, и потери тепла из зоны горения больше.

Из приведенных данных следует, что по интенсивности газообмена, определяющей скорость роста и максимальное значение температуры пожаров, все помещения можно разделить на две группы. Помещения, у которых отношение  $\frac{F_1}{F_{\text{пола}}} < \frac{1}{12}$ , относятся к помещениям с низкотемпературным режимом пожаров, т.е. для этой группы помещений развитие процесса горения, а следовательно, и интенсивности тепловыделения, сдерживают поступление воздуха и в объем самого помещения, и в

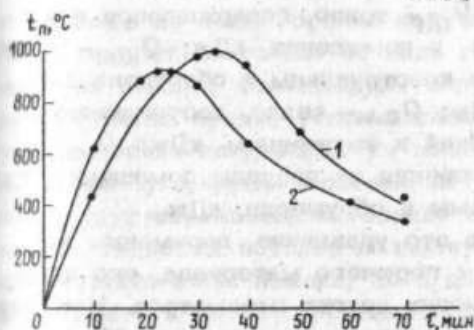


Рис. 6.6. Зависимость температуры внутреннего пожара от высоты помещения: 1 -  $H_{п} = 3,2$  м; 2 -  $H_{п} = 6,4$  м

зону горения. Помещения, у которых отношение  $\frac{F_1}{F_{\text{пола}}} > \frac{1}{12}$  относятся к помещениям с высокотемпературным режимом пожаров, т.е. в этих помещениях процесс горения развивается так же, как в условиях открытого пожара или близких к ним. Изменение температуры пожаров во времени, характерное для помещения с низкотемпературным режимом, соответствует кривой 4 (рис. 6.5), а с высокотемпературным режимом - кривой 6, которая является стандартной температурной кривой. Из рис. 6.5 следует, что различие температур пожара в помещениях с низкотемпературным и высокотемпературным режимами в среднем составляет  $200-250^{\circ}\text{C}$ . При этом необходимо иметь в виду, что такая же картина может сохраниться, когда горючие материалы с высокой теплотворной способностью горят в помещениях с низкотемпературным режимом, а горючие материалы с низкой теплотворной способностью горят в помещениях с высокотемпературным режимом.

Внутренний пожар - это более сложный случай процесса горения по сравнению с открытым пожаром, так как объем, где происходит горение, ограничен и не все тепло теряется безвозвратно. Поэтому для удобства анализа тепловой баланс внутреннего пожара записывают в несколько иной форме по сравнению с уравнением (6.6). Без учета начального тепло-содержания горючих материалов и воздуха, на данный момент времени он может быть представлен следующим уравнением.

$$Q_{п} = Q'_{п,г} + Q''_{п,г} + Q_{\text{кон}} + Q_{г,м} + Q_{\text{изл}}, \quad (6.9)$$

где  $Q_{п}$  - тепло, выделяющееся на пожаре, кДж;  $Q'_{п,г}$  - тепло, содержащееся в продуктах горения, удаляющихся из помещения,

где произошел пожар, кДж;  $Q_{п.г}''$  — тепло, содержащееся в продуктах горения, находящихся в помещении, кДж;  $Q_{кон}$  — тепло, поступающее к строительным конструкциям и оборудованию конвекцией и излучением, кДж;  $Q_{г.м}$  — тепло, поступающее к горючим материалам конвекцией и излучением, кДж;  $Q_{изл}$  — тепло, излучаемое из зоны горения за пределы помещения, где произошел пожар, через проемы и обрушения, кДж.

Все величины, входящие в это уравнение, переменны во времени. Они зависят от вида горючего материала, его количества, площади пожара и многих других параметров. Например,  $Q_{п.г}'' + Q_{г.м} + Q_{кон} + Q_{изл}$  изменяется в пределах 10–80% всего выделяющегося тепла и зависит от условий газообмена и продолжительности горения. Как показывает практика,  $Q_{изл}$  составляет 3–4%  $Q_{п}$ ;  $Q_{кон}$  — 6–8%  $Q_{п}$ ;  $Q_{г.м}$  — 1,5–3%  $Q_{п}$ , т.е. примерно 85–90% всего выделяющегося тепла на внутреннем пожаре идет на нагрев продуктов горения.

Величины  $Q_{п.г}'$  и  $Q_{изл}$  не приводят к повышению температуры в зоне пожара, так как в обоих случаях тепло уходит за пределы помещения.

$Q_{г.м}$  — тепло, идущее на нагрев горючего материала как горящего, так и подготавливаемого к горению, оно способствует интенсификации и распространению пожара. Количественно эта величина в общем балансе тепла мала (не превышает 3% от  $Q_{п}$ ), но качественно этот тепловой поток — один из самых опасных. Так, сведение  $Q_{г.м}$  к нулю практически приводит к локализации и тушению пожара.

$Q_{кон}$  — также очень опасный тепловой поток, так как повышение температуры несущих элементов конструкции приводит к резкому снижению их механической прочности, потере устойчивости и обрушению.

$Q_{п.г}''$  — это тепло, которое, выделившись в зоне горения, распределяется по всему помещению и определяет температуру пожара.

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

Тепло, передаваемое из зоны горения конвекцией при горении жидких горючих в условиях внутреннего пожара, составляет 55–60%, а при горении твердых горючих материалов, например, штабелей древесины, 60–70% от общего количества

тепла, выделяющегося на пожаре. Остальные 30-40% тепла передаются из зоны горения излучением. Соотношение этих величин зависит не только от вида горючего, но и от стадии развития пожара, температуры окружающих предметов, оптической плотности среды, условий газообмена. Поскольку конвективные потоки направлены из зоны горения преимущественно вверх, то суммарные тепловые потоки по различным направлениям будут неравноценны. Знание величины и направления суммарных тепловых потоков позволит определить не только соответствующие зоны пожара, но и доминирующее направление и интенсивность распространения пожара.

Из уравнения теплового баланса (6.9) получим выражение для приближенного расчета температуры пожара, исходя из следующих соображений: температура пожара обусловлена разностью

$$Q_{\Pi} - (Q'_{\text{п.г}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{г.м}}).$$

Величину тепловых потерь

$$Q_{\text{п.г}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{г.м}} \quad \text{для различных видов пожаров}$$

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

$$Q'_{\text{п.г}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{кон}} + Q_{\text{г.м}} = m Q_{\Pi}.$$

Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q_{\Pi} = Q''_{\text{п.г}} + m Q_{\Pi}. \quad (6.10)$$

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

$$Q''_{\text{п.г.}} = v'_M F_{\Pi} c_p [V_{\text{п.г}} + V_0(\alpha-1)](t_{\Pi} - t_H). \quad (6.11)$$

Окончательно

$$\beta v'_M Q_{\text{H}}^{\text{P}} F_{\Pi} = v'_M F_{\Pi} c_p [V_{\text{п.г}} + V_0(\alpha-1)](t_{\Pi} - t_H) + m \beta v'_M Q_{\text{H}}^{\text{P}} F_{\Pi}.$$

Откуда

$$t_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} (1-m) \beta}{c_{\text{р}} [V_{\text{п.г}} + V_{\text{о}} (\alpha - 1)]} + t_{\text{н}} \quad (6.12)$$

В этом выражении неизвестными величинами являются  $c_{\text{р}}$  и  $m$ . Если задаться значением  $c_{\text{р}}$  — среднеобъемной удельной теплоемкостью смеси газов, то можно определить температуру методом последовательных приближений. Кроме того, расчетные значения температуры являются средними по площади и по сечению помещения, что соответствует равномерному полю температур по всему объему. Однако на пожарах распределение температуры неравномерно по объему и нестационарно во времени.

Максимальная температура пожара, которая обычно выше среднеобъемной, бывает в зоне горения. По мере удаления от нее температура газов снижается за счет разбавления продуктов горения воздухом и потерь тепла в окружающее пространство. На рис. 6.7 показано температурное поле пожара в помещении объемом  $100 \text{ м}^3$  на 15-й минуте горения бензина на площади  $2 \text{ м}^2$ . Наивысшая температура в зоне горения  $900^{\circ}\text{C}$ , в самой удаленной точке  $200^{\circ}\text{C}$ .

Большое влияние на распределение температуры оказывает интенсивность газообмена и направленность конвективных газовых потоков. Например в помещениях с большой интенсивностью газообмена и высокотемпературным режимом, несмотря на интенсивное тепловыделение и высокую температуру в верхней части помещения, в нижней его части возможно пребывание людей благодаря интенсивному притоку холодного воздуха и интенсивному оттоку горячих продуктов горения. Причем неравномерность параметров газовой среды по вертикали проявляется тем резче, чем больше высота помещения. Очевидно, что и средняя температура такого пожара может быть сравнительно невелика.

В помещениях с малой интенсивностью газообмена и низкотемпературным режимом горение происходит с большим недостатком воздуха. Однако температура в помещении при таком горении почти одинакова по объему и может быть очень высокой за счет слабого оттока продуктов горения. Эти обстоятельства необходимо учитывать при тушении пожара для обеспечения безопасной и эффективной работы личного состава.

Очевидно, что при наличии расчетных методов, учитывающих неравномерность распределения температуры в объеме помещения, эта задача существенно облегчалась бы. Существенно



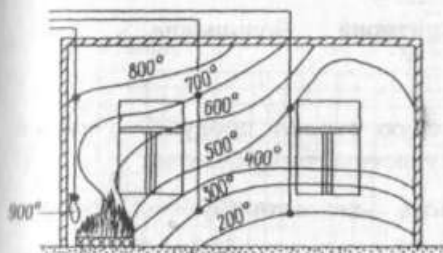


Рис. 6.7. Температурное поле внутреннего пожара

от методика, позволяющая рассчитать изменение среднеобъемной и локальной температуры пожара во времени в условиях внутреннего пожара. Хотя она не в полной мере отражает явления, которые происходят на реальных пожарах, но тем не менее представляет определенный прогресс в исследовании теплового режима внутренних пожаров. Основное упрощение, позволившее составить критериальное уравнение теплового баланса внутреннего пожара и решить его, заключается в том, что нестационарный процесс тепловыделения и теплообмена, происходящий на реальном пожаре, представлен как квазистационарный (предполагается, что в небольшие промежутки времени площадь пожара, массовая скорость выгорания и условия газообмена остаются постоянными). Тогда уравнение теплового баланса внутреннего пожара (6.6) в развернутом виде запишется так:

$$\beta v_M^* F_{\Pi} Q_{\Pi}^D = \beta v_M^* V_{\Pi, \Gamma} F_{\Pi} c_p (T_{\Pi} - T_{\Pi}) + a F_{\Pi} (T_{\Pi} - T_{\Pi}) + \sigma_o \epsilon_{\Pi} F_{\Pi} (T_{\Pi}^4 - T_{\Pi}^4), \quad (6.13)$$

Анализ уравнения (6.13) показывает, что для принятых допущений после обработки методом размерностей его можно представить в критериальной форме:

$$\frac{T_{rj}; x; y}{T_{теор}} = f \left( Bo; Nu; \frac{r}{r_o}; \frac{x}{x_o}; \frac{y}{y_o} \right), \quad (6.14)$$

где  $\frac{T_{rj}; x; y}{T_{теор}}$  - безразмерная температура среды в любой момент времени в точке с координатами  $x$  и  $y$ ;

$$Bo = \frac{\beta v'_M F_{II} V_{II} \gamma c_p}{\sigma_0 \epsilon_{II} F_{огр} T^3_{теор}} \quad - \text{ критерий Больцмана, ха-}$$

рактеризующий долю тепла, которую отдают продукты горения ограждающим поверхностям в лучистом теплообмене;

$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$  - критерий Нуссельта, характеризующий соотношение между теплом, передаваемым конвекцией, и теплопроводностью в идентичных условиях;  $\frac{\tau}{r_0}$  - безразмерное время;  $\frac{x}{x_0}$  - безразмерная координата;  $\frac{y}{y_0}$  - безразмерная координата.

Анализ величин, входящих в критерий  $Bo$  и  $Nu$ , показывает, что в условиях пожара среднеобъемная температура может быть представлена функцией

$$T_{ср} = f(q; \alpha; \tau), \quad (6.15)$$

где  $q = \frac{\beta v'_M Q_{II}^D F_{II}}{F_{огр}}$  - плотность теплового

потока, воспринимаемого поверхностями ограждающих конструкций, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;  $\tau$  - время.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила отыскать вид обеих функций и представить зависимости в виде номограмм (рис. 6.8). По номограмме можно определить изменение среднеобъемной температуры пожара во времени, а также изменение температуры среды в горизонтальном и вертикальном направлении. Следует помнить, что изменение среднеобъемной и локальной температуры помещения при горении твердых материалов будет отличаться от расчетного особенно в начале и конце пожара.

### § 6.3. Газообмен на внутреннем пожаре

Большое влияние на тепловой режим пожара, на интенсивность его развития, на скорость и направление распространения пожара и задымление внутреннего объема помещения ока-

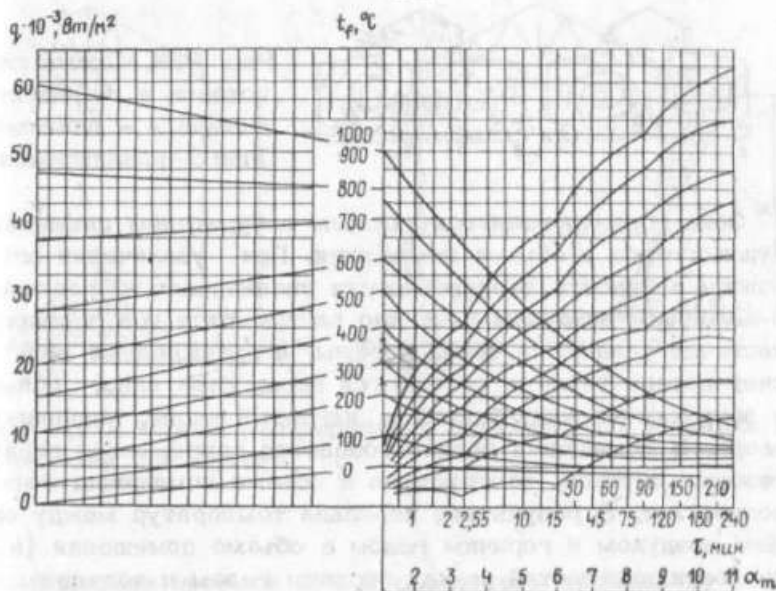


Рис. 6.8. Номограмма для определения температуры пожара

зывает газообмен – конвективные газовые потоки, образующиеся над зоной горения. Рассмотрим развитие пожара (рис. 6.9) с момента его загорания. Как известно, над всяким источником тепла формируется тепловая струя. Воздух (газ), нагретый в зоне горения до высокой температуры, уносится вверх, а взамен его к очагу пожара подтекают новые порции более холодного воздуха.

В начальной стадии развития пожара горение происходит за счет воздуха, находящегося в объеме помещения, газообмен с окружающей (внешней) атмосферой отсутствует. Нагретые в зоне горения до высокой температуры продукты горения поднимаются вверх, вовлекая по пути движения примыкающие к ним массы холодного воздуха. В результате обмена энергией тепловой струй (продуктов горения) с холодным воздухом ее скорость и температура по мере удаления от источника пожара уменьшаются и охлажденный воздух (а точнее, смесь воздуха с продуктами горения) вновь возвращаются к очагу горения. На ранней стадии, когда площадь пожара невелика, тепловая струя затухает, не достигнув верхнего перекрытия помещения (см. рис. 6.9).

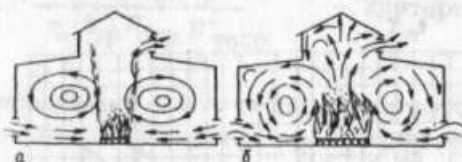


Рис. 6.9. Схема газовых потоков в помещении при пожаре: а – начальная стадия; б – развившийся пожар

Зона горения является мощным побудителем движения воздушных масс в объеме помещения. При увеличении площади пожара мощность тепловой струи увеличивается, горячие газы с холодным воздухом частично растекаются под перекрытием, частично удаляются через проемы, а охлажденный воздух за счет потерь теплоты опускается вдоль стен вниз, попадает в зону химических реакций и, нагретый вновь, поднимается вверх. В помещении здания создается непрерывная циркуляция газовых потоков, температура в объеме помещения постепенно возрастает. В результате перепада температур между окружающим воздухом и горячим газом в объеме помещения (из-за разности плотностей между горячим газом и холодным воздухом  $\rho_{\Gamma} < \rho_{\text{В}}$ ) возникает газообмен. Кроме того, поскольку объем нагретых газов больше того же объема холодных, а давление в помещении остается постоянным ( $p = p_{\text{бар}}$ ), то часть газов будет вытесняться за счет термического расширения. То есть масса газов ( $G = \rho V_{\text{пом}}$ ) в помещении будет постепенно уменьшаться по мере роста температуры. Взамен ушедшего из помещения газа поступает свежий воздух из окружающей атмосферы. Причиной газообмена является разность давлений столбов наружного и внутреннего воздуха, которая равна:

$$\Delta p = H \rho_{\text{В}} - H \rho_{\Gamma} = H (\rho_{\text{В}} - \rho_{\Gamma}), \quad (6.16)$$

где  $\Delta p$  – гравитационное давление (напор).

Основные закономерности газообмена на пожаре рассмотрим на примере помещения, показанного на рис. 6.10. Поскольку пожар является нестационарным физико-химическим процессом, сделаем следующие основные допущения:

1. Температура газов в помещении выше, чем температура окружающего воздуха, и с течением времени температура в помещении не изменяется.
2. Ветровые нагрузки на здание отсутствуют.

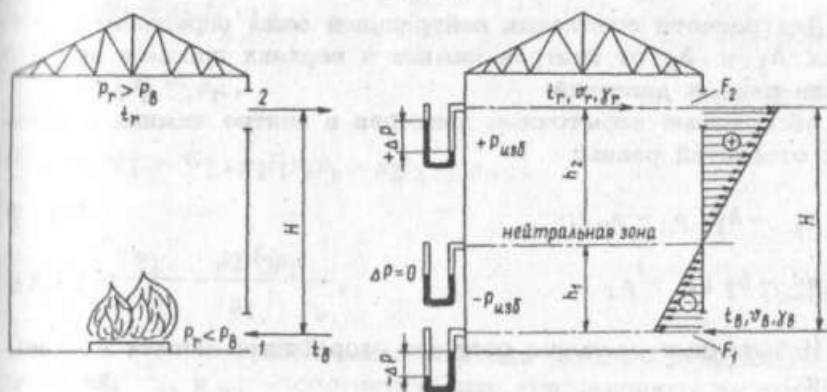


Рис. 6.10. Схема распределения статического давления в помещении при пожаре

3. Площади проемов 1 и 2 с течением времени не изменяются.

4. Масса втекающих в объем помещения газов равна массе удаляемых газов.

Так как при пожаре температура в помещении значительно выше, чем температура окружающего воздуха, то  $\rho_B > \rho_{r_0}$ . Под влиянием гравитационного давления начнется газообмен между окружающим воздухом и объемом помещения. Через нижний проем 1 в помещение будет входить более плотный окружающий воздух и выталкивать по закону Архимеда через проем 2 горячий газ – смесь продуктов горения с воздухом. Направление движения газовых потоков указывает на то обстоятельство, что давление в нижней зоне помещения меньше, а в верхней – больше давления окружающей среды. Если объем помещения мысленно рассечь по высоте множеством горизонтальных плоскостей, то найдется такая плоскость, в которой избыточное давление будет равно нулю. Эта плоскость называется плоскостью равных давлений или нейтральной зоной (НЗ). Положение нейтральной зоны можно менять путем изменения соотношения между площадями нижних и верхних проемов. Этим приемом часто пользуются практические работники – нейтральную зону “поднимают” вверх с целью снижения задымленности и уменьшения температуры в нижней рабочей зоне при тушении пожаров.

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

Абсолютные избыточные давления в центре нижних и верхних отверстий равны:

$$p_1 = h_1 (\rho_B - \rho_\Gamma); \quad (6.17)$$

$$p_2 = h_2 (\rho_B - \rho_\Gamma). \quad (6.18)$$

Избыточные давления создают скоростные напоры в отверстиях:

$$\text{для нижнего отверстия} \quad p_1 = \frac{v_1^2 \rho_B}{2g}, \quad (6.19)$$

$$\text{для верхнего отверстия} \quad p_2 = \frac{v_2^2 \rho_\Gamma}{2g}, \quad (6.20)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно скорости потока газов в нижнем и верхнем отверстиях.

Подставив значения  $p_1$  и  $p_2$  после преобразований, получим:

$$h_1 (\rho_B - \rho_\Gamma) = \frac{v_1^2 \rho_B}{2g}; \quad (6.21)$$

$$h_2 (\rho_B - \rho_\Gamma) = \frac{v_2^2 \rho_\Gamma}{2g}; \quad (6.22)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^2 \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma}. \quad (6.23)$$

Так как объемы входящего и выходящего газа различны из-за разницы плотностей, расчет будем вести по массовым расходам. При установившемся режиме газообмена масса воздуха, втекающего в помещение через нижнее отверстие 1, равна массе уходящих газов через верхнее отверстие 2, т.е.

$$G_1 = G_2.$$

Тогда  $G_1 = \mu_1 f_1 v_1 \rho_B;$  (6.24)

$G_2 = \mu_2 f_2 v_2 \rho_\Gamma,$  (6.25)

так как  $G_1 = G_2, \mu_1 f_1 v_1 \rho_B = \mu_2 f_2 v_2 \rho_\Gamma,$

откуда  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_2 f_2 \rho_\Gamma}{\mu_1 f_1 \rho_B},$  (6.26)

где  $f_1$  и  $f_2$  — соответственно площадь нижнего и верхнего отверстий;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — соответственно коэффициенты расхода нижнего и верхнего отверстий.

Подставив это выражение в формулу (6.23), получим:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{\mu_2 f_2 \rho_\Gamma}{\mu_1 f_1 \rho_B} \right)^2 \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma} \left( \frac{\mu_2 f_2}{\mu_1 f_1} \right)^2 \frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}. \quad (6.27)$$

Значения коэффициентов  $\mu_1$  и  $\mu_2$  даются в гидравлических справочниках, и с незначительной погрешностью при одинаковой форме отверстий они могут быть приняты равными для приточного и вытяжного отверстий ( $\mu_1 = \mu_2$ ), тогда:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}. \quad (6.28)$$

Следовательно, расстояние от плоскости равных давлений до центров нижних и верхних отверстий обратно пропорционально квадратам площадей этих отверстий и плотностям удаляемых газов и окружающего воздуха.

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

$$h_1 = \frac{H}{\left( \frac{f_1}{f_2} \right)^2 \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma} + 1}; \quad (6.29); \quad h_2 = \frac{H}{\left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \frac{\rho_\Gamma}{\rho_B} + 1}. \quad (6.30)$$

Учитывая, что плотность газа обратно пропорциональна температуре, эти выражения можно представить в виде:

$$h_1 = \frac{H}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 \frac{T_\Gamma}{T_B} + 1}; \quad h_2 = \frac{H}{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \frac{T_B}{T_\Gamma} + 1} \quad (6.31)$$

Скорости воздуха в отверстиях определяются по формулам:

$$v_1 = \sqrt{2gh_1 \frac{(\rho_B - \rho_\Gamma)}{\rho_B}}; \quad v_2 = \sqrt{2gh_2 \frac{(\rho_B - \rho_\Gamma)}{\rho_\Gamma}} \quad (6.32)$$

Подставив значения  $h_1$  в формулу скорости (6.25), получим выражение массового расхода приточного или удаляемого воздуха:

$$G_1 = G_2 = \mu_1 \mu_2 f_1 f_2 \sqrt{\frac{2gH(\rho_B - \rho_\Gamma) \rho_B \rho_\Gamma}{f_1^2 \rho_B + f_2^2 \rho_\Gamma}} \quad (6.33)$$

Если площади нижних и верхних отверстий неравны, например,  $f_1 > f_2$ , то увеличение газообмена может быть подсчитано по формуле [ 4 ] :

$$\frac{V_1}{V} = \frac{n\sqrt{2}}{\sqrt{n^2 + 1}}; \quad \frac{f_1}{f_2} = n;$$

$V_1$  и  $V$  - величины удельных воздухообменов при  $f_1 > f_2$  и  $f_1 = f_2$  соответственно, м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>). При  $n = 2$  газообмен увеличится приблизительно на 26%, при  $n = 0,5$  уменьшится на 36%.

Когда газообмен осуществляется через один дверной или оконный проем или через несколько проемов, расположенных на одном уровне, то в этом случае через верхнюю часть проема удаляются продукты горения, а нижняя часть работает на приток свежего воздуха. Положение нейтральной зоны относительно проема может быть рассчитано по следующим формулам:



$$h_1 = \frac{H}{\sqrt[3]{\rho_B/\rho_\Gamma + 1}}; \quad h_2 = \frac{H}{\sqrt[3]{\rho_\Gamma/\rho_B + 1}}, \quad (6.34)$$

где  $H$  - высота проема, м.

Уравнение для определения массового расхода при установившемся режиме ( $G_1 = G_2$ ) имеет следующий вид:

$$v = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{\frac{2gH^3(\rho_B - \rho_\Gamma)\rho_B\rho_\Gamma}{(\sqrt[3]{\rho_B} + \sqrt[3]{\rho_\Gamma})^3}}, \quad (6.35)$$

где  $b$  - ширина проема.

Таким образом, в условиях внутреннего пожара приток воздуха в зону горения и отток продуктов горения из помещения определяется геометрическими параметрами здания, такими как высота помещения, соотношение площадей отверстий, соединяющих внутренний объем с окружающей атмосферой, их взаимным расположением и т.д.

Газообмен при пожарах в зданиях характеризуется коэффициентом избытка воздуха,

Под коэффициентом избытка воздуха на внутреннем пожаре понимают отношение фактического массового расхода воздуха, поступающего к зоне горения, к теоретически необходимому секунднему массовому расходу воздуха на процесс горения:

$$\alpha = \frac{G_\Phi}{G_{\text{тп}}}. \quad (6.36)$$

Секундный массовый расход воздуха, теоретически необходимый для полного сгорания пожарной нагрузки при заданной площади пожара  $F_{\text{п}}$  и установившийся к данному моменту времени приведенной скорости выгорания  $v'_M$ , можно рассчитать по формуле

$$G_{\text{тп}} = v'_M F_{\text{п}} V_B^0 \rho_B, \quad (6.37)$$

где  $V_B^0$  - объем воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг горючего вещества,  $m^3/kg$ .

Секундный расход воздуха, поступающего в помещение, вычислим по формуле

$$G_B = \mu \omega F_{пр} \rho_B, \quad (6.38)$$

где  $F_{пр}$  - площадь проема,  $m^2$ .

Подставляя выражения для  $G_B^{\Phi}$  и  $G_B^{TP}$  в формулу (6.36), получим:

$$\alpha = \frac{\mu \omega F_{пр}}{v_M' F_{II} V_B^0} \quad (6.39)$$

На рис. 6.11 приведен график изменения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в объеме помещения по времени пожара.

Характер изменения коэффициента избытка воздуха объясняется тем, что газообмен осуществляется только внутри помещения под действием циркуляции тепловой струи (газообмен с окружающей средой отсутствует), который приводит к уменьшению содержания кислорода в объеме помещения. По мере развития площади пожара температура повышается и под действием гравитационного напора осуществляется газообмен внутреннего объема помещения с окружающей средой. В некоторый момент времени (при постоянной площади приточных и вытяжных отверстий) процесс горения выходит на стационарный режим (участок II, рис. 6.11). Необходимо отметить, что при постоянной площади проемов на стадии развившегося пожара произведение  $v_M' F_{II}$  будет величиной относительно постоянной. Поскольку приведенная массовая скорость выгорания ( $v_M'$ ) зависит от количества воздуха, поступающего в зону горения, то на установившемся режиме горения ( $G_1 = G_2$ ) площадь пожара ( $F_{II}$ ), достигнув определенной величины, должна изменяться незначительно. Поэтому при определенном соотношении площади приточного отверстия к площади пожара  $\frac{F_1}{F_{II}}$

будет вполне определенной приведенная массовая скорость выгорания, зависящая от физико-химических свойств пожарной нагрузки и коэффициента поверхности  $K_{II}$ .

Существенное влияние проемов на газообмен и развитие пожара происходит тогда, когда площадь пожара в 10 раз и более превышает приточную площадь проема, при  $\frac{F_1}{F_{II}} = 0,1$  процесс горения резко замедляется.

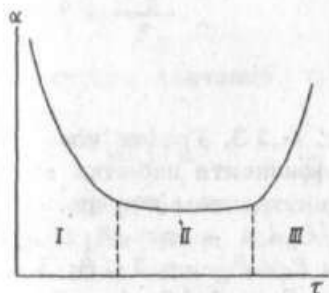


Рис. 6.11. Характер изменения коэффициента избытка воздуха на внутреннем пожаре

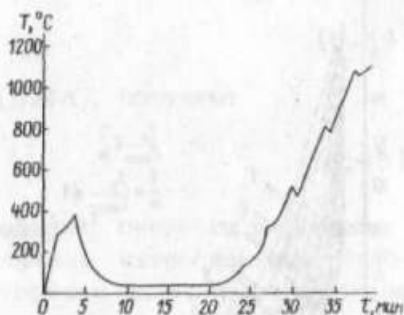


Рис. 6.12. Влияние газообмена на температурный режим пожара

На рис. 6.12 показано влияние газообмена на процесс горения внутри помещения. Испытаниями установлено, что на ранней стадии пожара при значительном удалении очага горения от окон помещения процесс горения поддерживается кислородом, содержащимся в воздухе помещения. При этом температура в помещении сначала повышается, а затем постепенно снижается. Это объясняется тем, что по мере расходования кислорода скорость выгорания уменьшается, уменьшается и тепловыделение. В дальнейшем процесс горения поддерживается за счет воздуха, поступающего через неплотности. После того как стекла в окнах разрушились, горение резко интенсифицируется и приводит к пожару во всем объеме помещения, а температура повышается до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Ориентировочные данные об изменении коэффициента избытка воздуха и скорости выгорания древесины на внутреннем пожаре в зависимости от отношения площади приточных проемов к площади пожара  $\frac{F_1}{F_{II}}$  при  $K_{II} = 4$  приведены на рис. 6.13. В экспериментах  $\alpha$  определяют по процентному содержанию кислорода в продуктах горения:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (6.40)$$

Количественной характеристикой газообмена на внутреннем пожаре является интенсивность газообмена. Интенсивностью газообмена называется количество воздуха, протекающего к

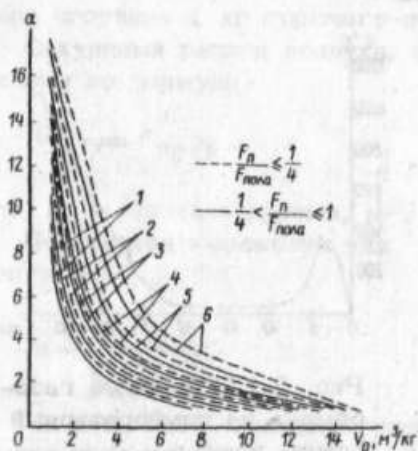


Рис. 6.13. График изменения коэффициента избытка воздуха на внутреннем пожаре от  $F_I/F_{II}$ . 1 - при  $F_I:F_{II} \gg 1:24$ ; 2 -  $F_I:F_{II} = 1:18$ ; 3 -  $F_I:F_{II} = 1:10$ ; 4 -  $F_I:F_{II} = 1:6$ ; 5 -  $F_I:F_{II} = 1:4$ ; 6 -  $F_I:F_{II} = 1:3$

единице площади пожара в единицу времени. Интенсивность газообмена подразделяют на фактическую  $I_{\Gamma}^{\Phi}$  и требуемую  $I_{\Gamma}^{ТР}$ :

$$I_{\Gamma}^{\Phi} = \frac{G_{\text{В}}^{\Phi}}{F_{\text{П}}} \quad (6.41)$$

Подставив значение  $G_{\text{В}}^{\Phi}$  в (6.41), получим:

$$I_{\Gamma}^{\Phi} = \frac{\mu v F_I \rho_{\text{В}}}{F_{\text{П}}} \quad (6.42)$$

Подставляя значение  $v$  в (6.42), получим:

$$I_{\Gamma}^{\Phi} = \mu \rho_{\text{В}} \frac{F_I}{F_{\text{П}}} \sqrt{2gh \left( \frac{\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{Г}}}{\rho_{\text{В}}} \right)} \quad (6.43)$$

Из выражения (6.43) видно, что фактическая интенсивность газообмена зависит от конструктивно-планировочных решений данного здания, помещения, сооружения  $\left( \frac{F_I}{F_{\text{П}}}; h; \mu \right)$  и от параметров пожара.

Требуемая интенсивность газообмена определяется по формуле:

$$I_{\Gamma}^{\text{ТР}} = \frac{G_{\text{В}}^{\text{ТР}}}{F_{\text{П}}}. \quad (6.44)$$

Подставив значение  $G_{\text{В}}^{\text{ТР}}$  в (6.44), получим:

$$I_{\Gamma}^{\text{ТР}} = v_{\text{М}}' V_{\text{О}} \rho_{\text{В}}. \quad (6.45)$$

Интенсивность газообмена определяет скорость выгорания пожарной нагрузки, полноту ее сгорания, интенсивность тепловыделения и теплообмена в зоне горения, скорость и направление распространения пожара, интенсивность дымообразования и скорость задымления помещения и др.

На рис. 6.14 показано распределение газовых потоков в объеме помещения в зависимости от взаимного расположения приточных и вытяжных отверстий и очага пожара. Чем дальше расположен очаг пожара от приточного отверстия, тем дальше "простреливает" помещение приточная струя. Часть тепловой конвективной струи, смешиваясь с приточным воздухом, уходит из помещения через фонарь, а остальная масса газа (смесь продуктов горения с воздухом) опускается вниз, смешивается с приточным воздухом и поступает к зоне горения. Циркуляция газов в объеме помещения и положения застойных (мертвых) зон зависят от места расположения очага пожара и конструктивно-планировочных особенностей здания. Аэродинамику газовых потоков внутри помещения необходимо учитывать при разработке автоматических систем пожаротушения, а также при введении боевых действий по ликвидации пожара.

Классификация помещений по интенсивности газообмена в зависимости от конструктивно-планировочных особенностей приведена в табл. 6.1.

Основные закономерности газообмена необходимо знать для правильного использования их при тушении пожара. На практике известны случаи, когда при недостатке сил и средств для тушения пожара в трюме судна, находящегося в рейсе, прибегают к герметизации отсека для снижения интенсивности тепловыделения. При этом охлаждают водой перегородки, соединяющие данный отсек с соседними.

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

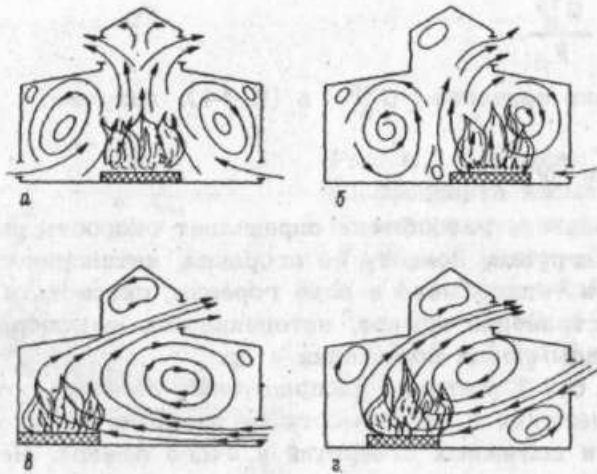


Рис. 6.14. Характер движения газовых потоков в объеме помещения в зависимости от взаимного расположения приточных и вытяжных отверстий и источника горения

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

$$V_{\text{д}} = \varphi v_{\text{м}}^* V_{\text{п.г}} F_{\text{п}} \frac{T_{\text{п}}}{T_0}, \quad (6.46)$$

где  $\varphi$  - коэффициент пропорциональности;  $v_{\text{м}}^*$  - приведенная массовая скорость выгорания,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $V_{\text{п.г}}$  - количество продуктов горения (дыма) при сжигании 1 кг горючего,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $F_{\text{п}}$  - площадь пожара,  $\text{м}^2$ ;  $T_{\text{п}}$  - температура пожара, К.

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

$$V_{\text{уд}} = \mu_2 F_2 \sqrt{2gh_2 \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п.г}}}{\rho_{\text{п.г}}}}, \quad (6.47)$$

Если количество удаляемого дыма пропорционально количеству дыма, выделяемого в зоне горения, то изменение концентрации дыма в помещении объемом  $V_{\text{пом}}$  по времени при

Группа помещений	Наименование помещения	Высота помещения, м	$F_1/F_{\text{пола}}$	Интенсивность газообмена, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
I	Подвалы, трюмы судов, камеры холодильников, горизонтальные туннели и т.п.	До 6	$< \frac{1}{12}$	До 1,5
II	Зрительные залы кинотеатров, здания без естественного освещения, вертикальные шахты, башни и др.	Свыше 6	$< \frac{1}{12}$	До 3
III	Жилые, общественные, вспомогательные и производственные помещения	До 6	$> \frac{1}{12}$	До 3,5
IV	Выставочные павильоны, зрительные залы и сцены театров, цирки, вокзалы, ангары и т.п.	Свыше 6	$> \frac{1}{12}$	До 6

постоянных площади горения, температуре пожара, полноте сгорания и скорости выгорания пожарной нагрузки запишется так:

$$\frac{dz}{dr} = \frac{V_{\text{д}} - V_{\text{уд}} Z}{V_{\text{пом}}},$$

где  $Z$  — концентрация дыма,

Задавшись степенью задымления или концентрацией дыма в объеме помещения определим время задымления до заданной его плотности

$$r = \frac{V_{\text{пом}}}{V_{\text{уд}}} \ln \frac{1}{1 - \frac{V_{\text{уд}}}{V_{\text{д}}} Z} \quad (6.48)$$

### § 6.4. Характерные схемы развития некоторых видов пожаров

Для прогнозирования обстановки на пожаре, для правильной организации боевых действий по ведению спасательных работ, по локализации и тушению пожара, для проектирования автоматических систем сигнализации и тушения пожара необходимо знать законы развития и изменения параметров пожара во времени и в пространстве.

Рассмотрим зависимость интенсивности развития пожара от вида и характера пожарной нагрузки, состояния горючих материалов и некоторых их специфических особенностей. Если горючий материал, составляющий пожарную нагрузку, однороден (например, древесина, кипы бумаги или другие горючие материалы) и равномерно размещен по площади пола и если в помещении нет ориентированных газовых потоков, то процесс горения будет распространяться равномерно во все стороны и будет иметь форму, близкую к круговой (рис. 6.15). Чем более горючий материал составляет пожарную нагрузку, тем интенсивнее развитие пожара. Чем больше скорость линейного распространения пламени, тем выше скорость роста площади пожара; чем выше теплота сгорания данного материала, тем больше скорость роста интенсивности тепловыделения на пожаре, выше скорость роста температуры пожара; чем мельче частицы материала (больше дисперсность), тем больше скорость выгорания его. Чем менее компактно уложен материал, тем больше коэффициент поверхности горения  $K_{\Pi}$ , тем больше поверхность нагревания горючего материала, легче поступает воздух в зону горения и интенсивнее выходят летучие фракции из горючего материала и тем, соответственно, выше скорость линейного распространения пожара и т.д.

Но поскольку неизвестно истинное значение зависимости скорости распространения пожара, то во время его развития  $v_p = f(r)$ , которая выражается через  $v_p = f_1(t_{\Pi})$ , где  $t_{\Pi}$  — температура пожара, которая также переменна во времени  $t_{\Pi} = f_2(r)$ , и зависит от  $v_p = f(r)$ , то в расчетные формулы для определения площади пожара в начальной стадии его развития и после введения первых стволов для тушения вводят поправочный коэффициент к скорости распространения пожара  $a < 1$ . Условно  $a$  принят равным 0,5. Также условно принято, что этот коэффициент в формулу  $F_{\Pi} = k(av_p t)^{\Pi}$  вводится для расчета площади пожара до 10 мин развития пожара и после вве-





Рис. 6.15. Схема развития пожара в помещении мебельного цеха

дения первых стволов, независимо от того, насколько  $I_{\phi}$  и  $Q_{\phi}$  соответствует  $I_{тр}$  и  $Q_{тр}$ .

Пример. Рассчитать изменение площади пожара во времени для здания мебельного цеха.

Здание цеха по производству мебели, где произошёл пожар, одноэтажное П-образной формы с пристроенными в торцах бытовыми помещениями, с общей площадью 2000 м<sup>2</sup> (рис. 6.15). Стены кирпичные, покрытие горючее (по металлодеревянным фермам уложен рабочий настил на ребро из досок. На тесовую подшивку уложен утеплитель, сверху он закрыт двумя слоями теса. Кровля в два слоя из рубероида). Цех состоял из трех отделений с площадью: заготовительного 1 - 508 м<sup>2</sup>, сборочного 2 - 900 м<sup>2</sup>, отделочного 3 - 500 м<sup>2</sup>. Заготовительное и сборочное отделения разгорожены гипсовой перегородкой, доходящей до нижнего пояса металлодеревянной фермы, верхняя часть перегородки обшита тесом. Эти помещения соединялись проемом а защищенным противопожарной дверью. Сборочное и отделочное отделения разделены капитальной стеной, в которой было два технологических проема б и в без противопожарной защиты.

В день пожара в заготовительном отделении, кроме технологического оборудования, было около 10 м<sup>3</sup> заготовок теса, в сборочном отделении 40 шкафов, две ваймы и около 11 м<sup>3</sup>

щитов, в отделочном отделении находились две покрасочные камеры, кирпичная кладовая для хранения сменной потребности лаков, цеховая лаборатория и более 160 шкафов.

Для такого объекта линейную скорость распространения пожара можно условно принять равной 2 м/мин.

Расчет площади пожара при свободном развитии производится исходя из предположения о равновероятном распространении пламени в горизонтальной плоскости. В рассматриваемом случае пожар возник на некотором удалении от угла помещения (см. рис. 6,15). Пожар в этом случае будет распространяться по форме полукруга (показан пунктиром) до того момента, пока пламя не достигнет торцевой стены сборочного отделения. Однако дальше рассчитать  $F_{\Pi}$  невозможно, так как форма площади становится неопределенной. В аналогичных случаях искусственно переносят место возникновения пожара в угол помещения. Тогда распространение пожара по сектору будет осуществляться до того момента, пока фронт горения не достигнет стены, разделяющей сборочное и заготовительное отделения, т.е. пройдет путь в 19 м. В первые 10 мин развития пожара скорость распространения пламени принимается равной  $0,5 v_p^{\text{табл}}$  (в рассматриваемом случае - 1 м/мин). За 10 мин с этой скоростью пожар распространится на 10 м и площадь его составит:

$$F_{\Pi}^{10} = \frac{\pi}{4} (0,5 v_p^{\text{табл}} r)^2 = \frac{3,14}{4} (0,5 \cdot 2 \cdot 10)^2 \approx 80 \text{ м}^2.$$

В последующие моменты времени (свыше 10 мин) скорость распространения пламени принимается равной 2 м/мин. Оставшееся расстояние в 9 м со скоростью 2 м/мин пламя пройдет за 4,5 мин, и площадь пожара на 15 мин составит:

$$F_{\Pi}^{(15)} = \frac{\pi}{4} \left[ 5v_p^{\text{табл}} + v_p^{\text{табл}} (r_1 - r) \right]^2 = 0,785 [5 \cdot 2 + 2(15 - 10)]^2 = 314 \text{ м}^2.$$

Для упрощения дальнейших расчетов условно примем, что фронт горения распространяется по ширине помещения. Тогда площадь пожара составит  $F_{\Pi}^{(15)} \approx 360 \text{ м}^2$ .

Далее фронт горения будет распространяться до стены, разделяющей сборочное и отделочное отделения. Оставшийся путь в 28 м пламя пройдет за 14 мин, т.е. к 29 мин свободного развития пожара его площадь составит:  $F_{\Pi}^{29} \approx 900 \text{ м}^2$ .

Распространение пламени в сборочное отделение не будет происходить, так как проем *a* защищен противопожарной дверью. Через проемы *b* и *в* пожар распространится в отделочное отделение. Для расчета площади пожара условно принимаем (как и в предыдущем случае), что распространение пожара по отделочному отделению начинается из угла (потому что расчет  $F_{\Pi}$  с учетом распространения пожара через проемы *b* и *в* с некоторого момента становится невозможным). Тогда пожар будет распространяться по форме сектора до того момента, пока фронт горения не пройдет путь в 13 м со скоростью 2 м/мин, т.е. до 35,5 минуты. Далее предполагается, что фронт горения распространяется по ширине помещения и с учетом этого площадь пожара на 35,5 мин будет равна:

$$F_{\Pi}^{(35,5)} = 900 + 13 \cdot 13 = 1100 \text{ м}^2.$$

Наконец, оставшееся расстояние в 20 м фронт горения пройдет за 10 мин и площадь пожара на 45,5 мин составит:

$$F_{\Pi}^{(45,5)} = 1100 + 13 \cdot 20 = 1360 \text{ м}^2.$$

По полученным данным строят график зависимости площади пожара от времени (рис. 6.16). Следует заметить, что пожар может распространиться и в заготовительное отделение по горючему покрытию, т.е. приведенный расчет площади пожара является приближенным.

Эти взаимосвязи просматриваются при принятых ранее условиях: однородной пожарной нагрузке; равномерном ее расположении в горизонтальной плоскости; отсутствии ярко выраженных других факторов, влияющих на скорость и направление развития пожара (при равномерном и однородном поле температур, отсутствии внешних принудительных газовых потоков и др.).

Если пожарная нагрузка неоднородна, а состоит из более и менее горючих материалов, то распространение и развитие пожара существенно изменится. В характере распространения процесса горения появится доминирующее направление  $v_{dom}$ . Этот фактор и будет определять направление и скорость распространения процесса горения, а стало быть, величину и форму площади пожара и все остальные параметры динамики его развития.

То же самое произойдет в случае, если однородная пожарная нагрузка размещена неравномерно. Особенно если часть ее

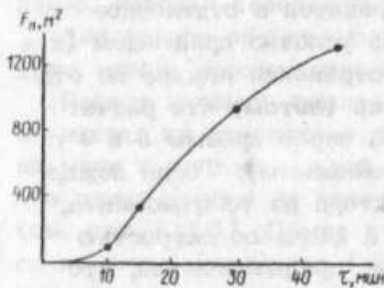


Рис. 6.16. График роста площади пожара во времени

лона плоскости размещения горючего материала, рассмотрены в гл. 2, рис. 2.6.

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

Пожарная нагрузка неоднородна. Таких вариантов множество. Одного и того же вида пожарная нагрузка неравномерно размещена (рис. 6.17). При разнородной пожарной нагрузке (рис. 6.18) пожар будет распространяться быстрее и интенсивнее по более легкогорючим материалам. Если пожарная нагрузка размещена неравномерно и различается по структуре (рис. 6.19), в реальных условиях процесс горения будет распространяться неравномерно и по направлению, и по скорости.

Пространственное размещение однородной и неоднородной пожарной нагрузки. При пространственном (наиболее реальном) размещении пожарной однородной нагрузки преимущество распространения пожара будет определяться направлением действия сил конвекции. Примером может служить распространение пожара в высотных зданиях и высокостеллажных складах (рис. 6.20).

Известно, что, когда вектор распространения горения совпадает с вектором конвективных потоков, скорость распространения горения увеличивается в 2-3 раза и более. И наоборот, если направление вектора распространения горения не совпадает с вектором конвективных потоков, скорость распространения горения начинает убывать и в пределе может стать равной нулю.

Еще больше усложнится задача прогнозирования обстановки

расположена горизонтально (т.е. размещена в плоскости пола или на некотором уровне от пола), а значительная часть ее размещена вертикально (обшивка стен горючими материалами, картины, занавеси, стеллажи книгохранилищ, складов и др.). При прочих равных условиях доминирующим направлением распространения процесса горения станет вертикальное. Причем  $v_p^{dom}$  может быть в 2-3 раза больше, чем  $v_p$ . Характер зависимости  $v_p = f(\alpha)$ , где  $\alpha$  - угол наклона

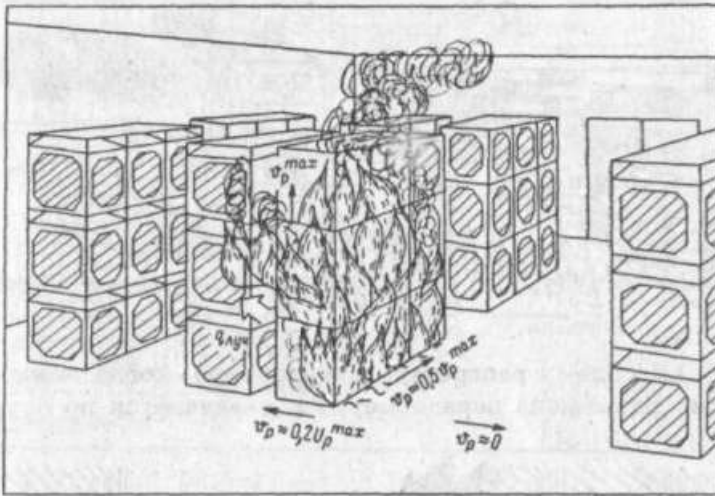


Рис. 6.17. Схема распространения пожара при неравномерном размещении пожарной нагрузки

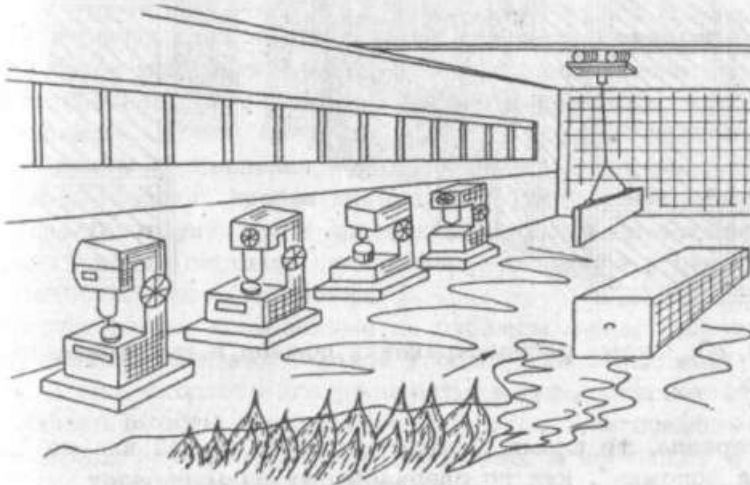


Рис. 6.18. Схема распространения пожара при разнородной пожарной нагрузке

на пожаре, если в зоне горения находятся неоднородные горючие вещества и материалы. Например, если в книгохранилище по полу выстлана ворсистая ковровая дорожка из синтетическо

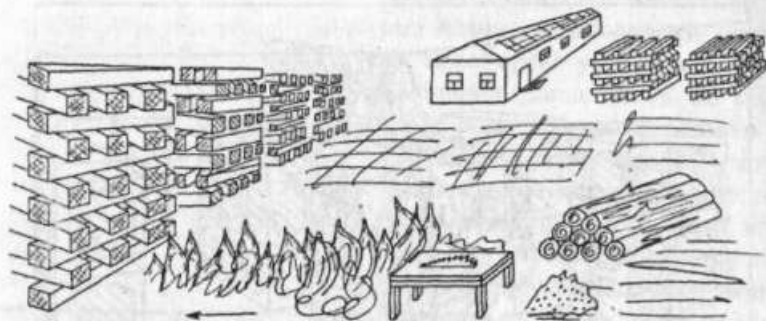


Рис. 6.19. Схема распространения пожара, когда пожарная нагрузка размещена неравномерно и различается по структуре

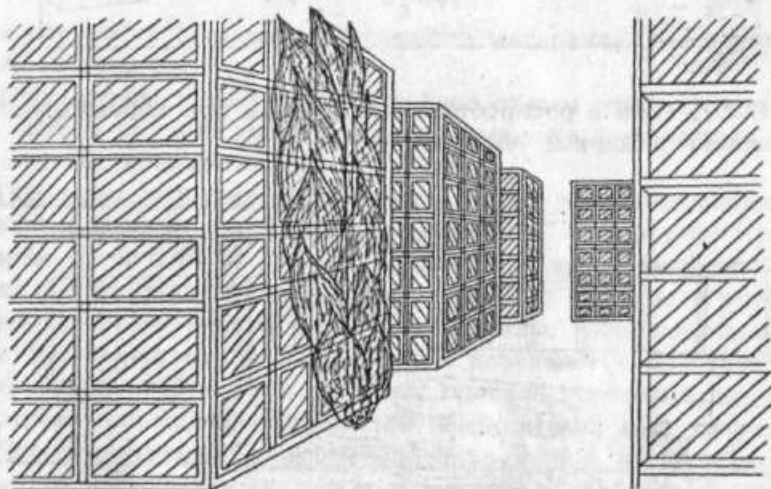


Рис. 6.20. Схема распространения пожара в высокоэтажных складах

го материала, то пламя распространяется по ней, как по "пороховой дорожке", как по специальному пламяпроводу (рис. 6.21). Тогда, по законам действия конвективных газовых и тепловых потоков, пламя по стеллажу пойдет вверх, а по легкогорючей и легковоспламеняемой ковровой дорожке распространяется до противоположной стены книгохранилища. Если стеллажи по торцам отделаны декоративным легковоспламеняемым и быстрогорящим пластиком, лаком, масляной краской и другими горючими покрытиями, то по ним пламя будет рас-

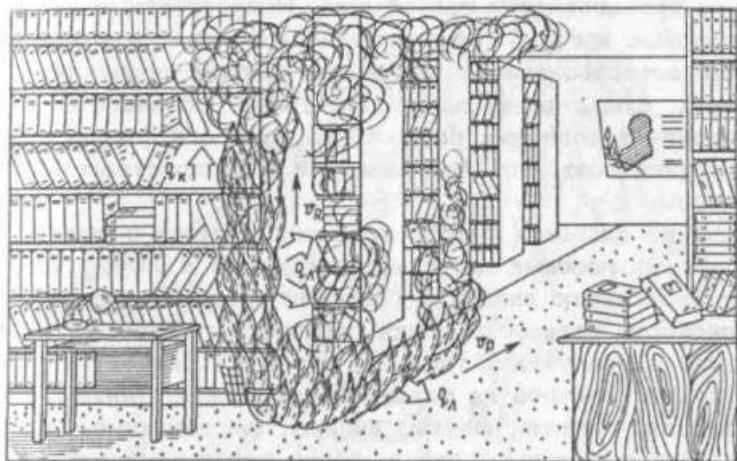


Рис. 6.21. Схема распространения пожара при наличии отделочных и декоративных материалов

пространяться еще быстрее. Распространение пожара по этим видам горючих материалов вверх и в направлении их размещения будет еще интенсивнее, а задача правильного расчета и прогнозирования направлений и скорости развития пожара — еще сложнее. И тем не менее уметь хотя бы приблизительно оценивать направление и интенсивность развития пожара в реальных условиях крайне необходимо. Необходимо это и инженерам-конструкторам и проектировщикам, разрабатывающим автоматические системы сигнализации о пожаре и системы автоматического пожаротушения.

Исследования, проведенные за рубежом, показали, что при возникновении пожара в складе у основания стеллажей уже через 3 мин скорость его распространения достигает 10 м/мин. Увеличение высоты стеллажей с 2,5 м до 5 м повышает интенсивность тепловыделения в 9–10 раз, а поскольку в этих условиях она пропорциональна интенсивности выгорания пожарной нагрузки, значит, и скорость выгорания возрастает более чем в 10 раз. Локальная температура под крышей уже через 3–5 мин достигает  $870^{\circ}\text{C}$  (а прочность металлических конструкций резко снижается при  $t_{II}=350 - 400^{\circ}\text{C}$ , и при  $450^{\circ}\text{C}$  происходит потеря устойчивости).

Динамика распространения и развития пожара во многом

зависит от интенсивности газообмена. Искусственные и естественные газовые потоки, существующие в зданиях и помещениях, а особенно естественные конвективные потоки, возникающие при пожарах, существенно влияют не только локально на процессы горения в зоне уже распространяющегося факела пламени, но и определяют весь ход развития и распространения пожара в целом.

Увеличение скорости распространения горения с ростом скорости попутных газовых потоков, приводящее к двух-, трехкратному увеличению линейной скорости распространения пожара и скорости распространения процессов горения вверх по направлению конвективных газовых потоков, приводит к резкой интенсификации пожаров на таких объектах, как: театры, высотные здания, туннели, шахты, ангары, выставочные павильоны и т.п. Эти воздушные потоки, резко интенсифицируя динамику пожаров, создавая неожиданные, иногда трудно поддающиеся учету и прогнозированию, направления интенсивного распространения пожара, сильно осложняют обстановку на пожаре. При этом уделяется особое внимание опасности распространения пожара по вентиляционным каналам и лифтовым шахтам, по лестничным клеткам и коммуникациям, по покрытиям больших площадей и другим конструктивным элементам зданий.

Нередко на направление и интенсивность распространения пожара решающее влияние оказывают даже такие непредвиденные обстоятельства, как изменения агрегатного состояния горючих материалов. К ним относится растекание расплавленных горящих масс горючих веществ, которые при нормальных условиях являются твердыми материалами, например, проникновение и развитие пожара внутрь здания при горении покрытий больших площадей. Расплавленные смолы, битум, пенополистирол или пенополиуретан горят и стекают через неплотности в покрытии, что является причиной пожара внутри зданий и помещений (рис. 6.22).

Знание всех этих особенностей необходимо для правильной оценки обстановки на пожаре. И в первую очередь, это необходимо знать РТП, в задачи и обязанности которого входит, проводя боевую разведку, достаточно точно прогнозировать обстановку на пожаре, определить решающее направление и характер боевых действий, количество и положение отдельных боевых участков и их задачу, необходимость вызова дополнительных сил и средств и т.д.

Распространение пожара за пределы одного помещения. Как известно, реальные пожары сравнительно редко ограничиваются



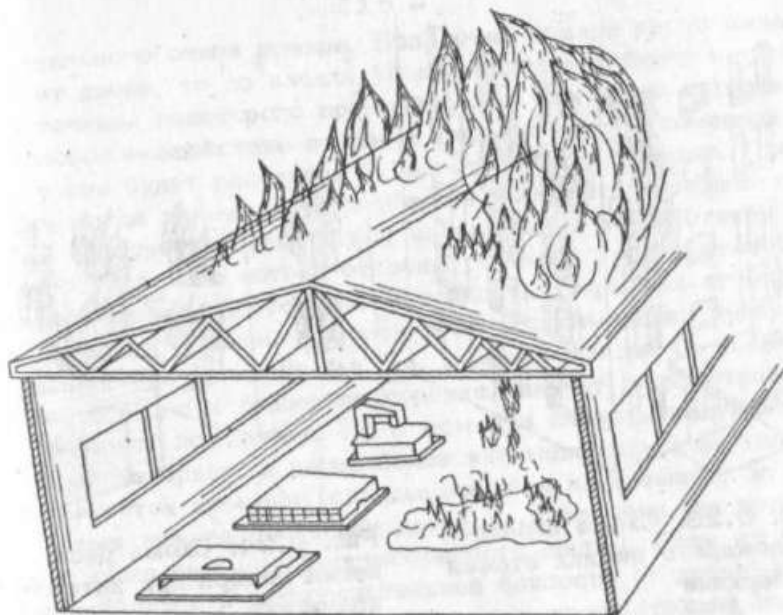


Рис. 6.22. Схема перехода пожара извне внутрь помещения

зоной их первоначального возникновения. Если не будут приняты специальные активные меры по их локализации и тушению, то через некоторое время, после разрушения остекления, прогорания дверей, изолирующих перегородок, перекрытий или по другим каналам пожар перебрасывается за пределы одного помещения и начинает интенсивно распространяться дальше.

Обычно раньше всего пламя пожара выходит за пределы помещения, где оно первоначально возникло, через оконные проемы, если дверь помещения была при этом плотно закрыта. Это происходит, во-первых, потому, что остекление окон, как правило, разрушается при среднеобъемной температуре пожара 250-300°C (т.е. через 10-15 мин после начала пожара); во-вторых, при недостатке воздуха в зоне горения, который обычно имеет место при внутренних пожарах, эти горячие газы сторгают за пределами помещения, в оконных проемах и над ними. Языки пламени из окна с разрушившимся остеклением вместе, с горячими продуктами горения устремляются вверх и достигают оконных переплетов верхних этажей, которые могут воспламениться (рис. 6.23).

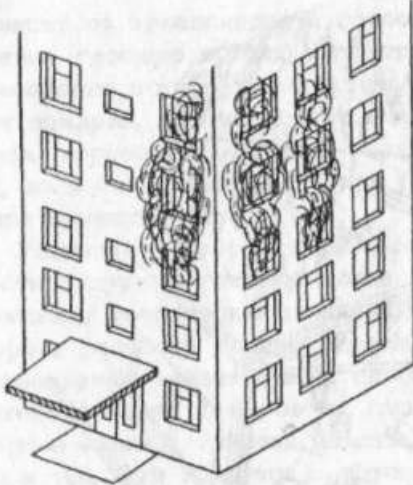


Рис. 6.23. Схема перехода пожара с нижних этажей на верхние

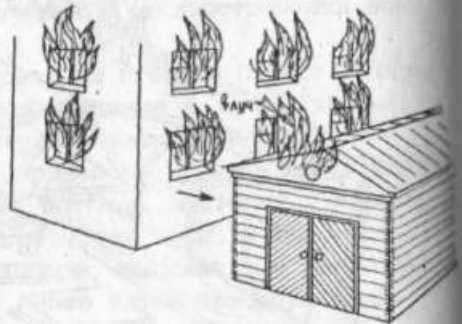


Рис. 6.24. Схема распространения пожара при интенсивном излучении

При очень интенсивном горении пожар может переброситься на близрасположенное здание по механизму передачи лучистой энергии или от искр и головней\* (рис. 6.24).

Еще более естественным и опасным путем распространения пожара за пределы помещения, где он первоначально возник, являются дверные проемы, если дверь в момент возникновения пожара не была закрыта или если она самопроизвольно открылась под действием избыточного давления газовой среды в горящем помещении. Даже если дверь плотно закрыта, это одно из слабых мест в отношении опасности распространения пожара за пределы горящего помещения, так как огнестойкость дверей, как правило, сравнительно мала и составляет 10–15 мин, а иногда и 4–5 мин. Огнестойкость двери зависит от конструкции материала, из которого она изготовлена, от режима горения в помещении, а также от характера размещения пожарной нагрузки и относительного расположения

---

\* Вероятность распространения пожара несколько меньше рассмотренной выше, однако пренебрегать ею не следует, так как в реальных условиях такие случаи неоднократно имели место,

первоначального очага пожара. Если очаг пожара расположен далеко от двери, то до начала ее загорания она будет испытывать в течение некоторого времени более или менее интенсивное тепловое воздействие процесса горения внутри помещения. Поэтому она будет разогрета и подготовлена к горению. Кроме того, когда пламя достигнет двери и начнется процесс ее горения, он будет протекать под интенсивным воздействием лучистого теплового потока от зоны горения, расположенной внутри помещения. Поэтому огнестойкость двери как огнепреграждающей конструкции, с момента ее воспламенения будет минимальна, она прогорит быстро, и пламя пожара (а также продукты полного и неполного горения) начнет распространяться на смежные помещения. Но с момента начала пожара это произойдет не сразу, а через более или менее продолжительный промежуток времени (складывающийся из времени, за которое пламя пожара достигнет двери  $t_1$ , и времени, за которое прогорит сама дверь  $t_2$  — огнестойкость двери). Если же очаг пожара находится в непосредственной близости от двери, например, при загорании бумаги и мусора в урне, стоящей под дверью, она загорится практически сразу, как только ее поверхность прогреется до температуры начала пиролиза древесины ( $t_{\text{нач пир}} = 250^\circ\text{C}$ ). А окрашенная краской или оклеенная горючими синтетическими декоративно-отделочными материалами дверь загорится еще раньше. При этом огнестойкость двери  $t_2'$  будет даже выше, чем в предыдущем случае  $t_2$ . Но пожар выйдет за пределы горящего помещения еще быстрее, чем в первом случае, так как  $t_2' < t_2 + t_1$ .

Другой путь распространения пожара за пределы помещения — это переход горения через вертикальные и горизонтальные ограждающие конструкции (рис. 6.25). По вертикальным ограждающим конструкциям пожар может интенсивно распространяться с обогреваемой стороны в пределах того же помещения, если эти конструкции покрыты горючими, а тем более легковоспламеняемыми декоративно-отделочными синтетическими материалами. Если же ограждающие конструкции обладают низкой огнестойкостью и способны прогореть или частично разрушиться под воздействием пламени или высоких температур на обогреваемой поверхности, то пожар распространится в смежное помещение. В некоторых специальных помещениях вертикальные ограждающие конструкции обладают столь высокой теплопроводностью, что способны так интенсивно передавать тепло на необогреваемую сторону, что на ней произойдет воспламенение горючих покрытий или даже горючих элементов близлежа-

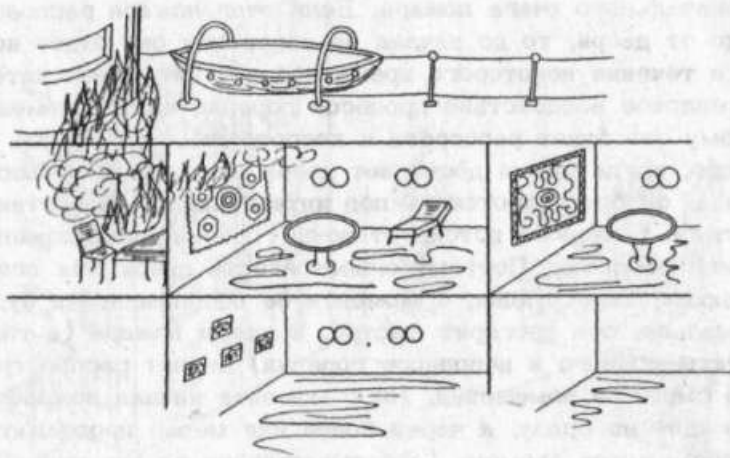


Рис. 6.25. Схема распространения пожара за пределы помещения через ограждающие конструкции

шей пожарной нагрузки. Такими конструкциями являются переборки в судовых каютах, лабораторные боксы, перегородки, смонтированные из металлических сборных или сварных элементов, и т.д.

Через горизонтальные ограждающие конструкции пожар может распространиться через перекрытия в этажи здания, расположенные выше горящего помещения. Пожар лишь в редких случаях переходит через перекрытие в этажи, расположенные ниже горящего помещения. Чаще всего он распространяется в верхние этажи.

Наиболее опасными путями распространения пожара в верхние этажи здания являются различные пустоты в строительных конструкциях, вентиляционные и кабельные каналы и т.п. Продукты неполного сгорания, интенсивно выделяющиеся в горящем помещении, по законам естественной конвекции устремляются по таким каналам вверх. Скопление их с последующим внезапным воспламенением может вызвать даже взрыв с разрушением элементов конструкции здания и выбросом пламени и продуктов горения в смежные помещения.

## § 6.5. Особенности динамики пожаров на транспорте

Развитие пожаров на судах. Анализ статистики пожаров на судах показывает, что пожары в основном происходят в следующих помещениях и отсеках:

- в жилых и служебных помещениях - 32%;
- в машинно-котельных отделениях (МКО) - 36%;
- в грузовых отсеках - 30%;
- на открытых палубах - 2%.

По данным зарубежной статистики, 70% из общего числа пожаров возникает при нахождении судна в порту или на ремонте и 30% - в море.

На характер развития внутреннего пожара судна существенное влияние оказывают конструктивно-планировочные решения помещений.

Большая часть судов построена из стали. В корпусе судна, надстройках, рубках имеется разветвленная сеть жилых и служебных помещений, связанных между собой коридорами, трапами или шахтами трапов. Количество выходов на верхнюю открытую палубу ограничено. Пожарная нагрузка достигает 60-70 кг/м<sup>2</sup>. Между отделкой бортов, подволоки, пола и металлической основой судна образуются воздушные зазоры. По ним прокладываются различные коммуникации: трубопроводы, электрокабели, воздуходувы систем вентиляции, которые способствуют развитию пожара и перебросу пламени из одного помещения в другое. Высота жилых и служебных помещений примерно постоянна для всех судов и составляет 2,4-2,7 м.

Пожары в жилых и служебных помещениях, как правило, начинаются с загорания в одном из помещений (каюте, салоне, кладовой) и некоторое время развиваются скрыто. Процесс горения осуществляется за счет воздуха, содержащегося в объеме помещения и подаваемого по системе вентиляции. Кратность воздухообмена в жилых и служебных помещениях равна 3-4. Выделяющиеся продукты горения заполняют объем помещения, а также через неплотности и смежные с ним отсеки нагревают отделочные материалы переборок, мебель и др. Пожар, как правило, обнаруживают визуально или по запаху дыма. Во время тушения таких пожаров не рекомендуется открывать дверь помещения, в котором происходит пожар, так как это приводит к резкой интенсификации горения за счет поступления свежих порций воздуха из коридора. При открытии двери пламя выбрасывается в коридор, что приводит к повышению температуры в нем за счет быстрого сгорания продуктов терми-

ческого разложения. Коридор быстро заполняется дымом, токсикологическая обстановка резко ухудшается и становится опасной для пребывания людей в коридоре и соседних помещениях. Пожар резко возрастает, так как один из главных его параметров — площадь пожара — больше не имеет ограничений и может увеличиваться беспрепятственно. В процессе развития и протекания пожара в этой группе помещений можно выделить три характерные стадии развития. Начальная стадия, которая длится с возникновения пожара до полного "охвата" всего помещения пламенем, температура в помещении может достигать 450 — 500<sup>0</sup>С. Длительность этого периода зависит от размеров первоначального очага загорания, его местоположения, характера расположения пожарной нагрузки в помещении и т.п. и может продолжаться до 20 мин.

Стадия активного горения начинается с общей "вспышки" в объеме помещения и длится до выгорания 70—80% пожарной нагрузки. В этот период в объеме помещения температура достигает своего максимального значения.

И, наконец, стадия затухания, которая характеризуется спадом температуры и длится до полного выгорания пожарной нагрузки.

На каждой стадии пожара характерным является и распространение пламени. На начальной стадии линейное распространение пламени происходит по поверхности пожарной нагрузки со скоростью 1,5 — 2 м/мин в зависимости от физических свойств отделочных материалов. На этой стадии пожар развивается в пределах одного помещения.

Для второй стадии характерно распространение горения на смежные помещения. Процесс распространения пламени носит объемный характер вследствие возникновения новых очагов горения на некотором расстоянии от первоначального, например, под действием излучения пламени, конвективных токов нагретых газов или теплопроводности. В этом случае линейная скорость распространения пламени резко возрастает и ее значение приближается к скорости распространения пламени по газозадушным смесям. Стадия активного горения является наиболее опасной.

Исследованиями температурного поля в объеме жилых и служебных помещений установлено, что наибольшая неравномерность температур по высоте помещения наблюдается при наименьшей пожарной нагрузке, а при нагрузке 30 кг/м<sup>2</sup> и больше на стадии активного горения температура по высоте помещения практически не изменяется. Температура продуктов го-

рения в верхней части дверного проема каюты несколько выше среднеобъемной. Процесс горения в этой группе помещений может саморегулироваться за счет газообмена, газообмен ограничивает скорость роста площади пожара и ее максимальное значение.

В условиях развитого пожара коридоры, дымопроницаемые шахты, отдельные траповые марши, лифты, воздуховоды становятся своеобразной дымовой трубой. По ним пожар может распространиться в рубки постов управления судном и серьезно осложнить обстановку по ликвидации пожара.

Специфика развития пожаров на судах накладывает определенные трудности на проведение спасательных операций, так как эвакуация людей и имущества идет снизу вверх, в зону распространения дыма и высоконагретых продуктов горения.

В машинно-котельных отделениях (МКО) всех судов используют жидкое топливо с температурой вспышки выше  $61^{\circ}\text{C}$ . Пожары в МКО происходят вследствие утечек топлива из расходных цистерн, трубопроводов топливной системы и др. Воспламенение пролитого топлива происходит в результате его контакта с нагретыми до высокой температуры поверхностями (выхлопные патрубки, коллекторы двигателей, стенки котлов) и под действием открытого пламени. Особенно интенсивно происходит развитие пожара в МКО при разрушении топливных и масляных трубок, находящихся под высоким давлением. Мелкодиспергированное топливо образует мощный факел пламени с высокоразвитой поверхностью горения, что приводит к резкому повышению температуры в объеме машинного отделения.

Развитию пожара в МКО способствует большая по сравнению с другими судовыми помещениями кратность газообмена. Поэтому при ликвидации такого пожара в первую очередь необходимо отключить разрушенную топливную магистраль, вентиляцию, принять меры к предупреждению взрыва топливных цистерн и сосудов высокого давления.

Пожары в МКО характеризуются высоким температурным режимом, запущенный пожар в результате прогрета переборок и подволока способствует распространению пожара на смежные отсеки-надстройку, трюмы и т.п. Гораздо реже пожары распространяются из смежных отсеков в МКО.

Пожары на танкерах сравнительно редки, но большинство их приводит к сильным повреждениям или гибели судна. Они, как правило, сопровождаются взрывами топливно-воздушной смеси в танках, которые вызывают деформацию корпуса судна. Возникновение взрыва и пожара зависит от загазованности

помещений путем распространения газа и наличия в загазованном помещении источников зажигания. Образование взрывоопасных концентраций в танках происходит под действием повышения температуры, а также колебаний нефти при движении судна.

Взрывы и пожары на танкерах можно предотвратить за счет конструктивных мероприятий, исключающих возможность образования горючих паровоздушных смесей, а также применяя системы контроля газовой среды и предупреждения об образовании взрывоопасных концентраций.

Наиболее опасными являются пожары в танках, близко расположенных к надстройкам и командным рубкам. Пожар из танка может распространиться под действием ветра в эти помещения через открытые двери или иллюминаторы, что осложняет обстановку управления судном, а следовательно, и процесс ликвидации пожара. Поэтому при тушении пожара судно необходимо сориентировать относительно ветра так, чтобы пламя не попадало на командную рубку.

Особую опасность представляют пожары тяжелых нефтепродуктов, склонных к вскипанию и выбросу. Разлив и горение нефтепродуктов вокруг судна резко осложняют обстановку, приводят к увеличению площади пожара на судне, затрудняют эвакуацию людей.

Причинами пожаров в сухогрузных трюмах являются:  
тепловое, химическое или биологическое самовозгорание грузов;

небрежное обращение с огнем;

нарушение правил пожарной безопасности при работе с открытым огнем.

Пожар в трюме, как правило, протекает в режиме тления с сильным задымлением. Это объясняется плотностью укладки пожарной нагрузки в объеме трюма и ограниченным газообменом. Температура развившегося пожара достигает высоких значений, что затрудняет его ликвидацию. Большая плотность укладки и сильная задымленность осложняют доступ к очагу горения.

Даже при локальном горении пожар в большинстве случаев приводит к порче всего груза.

Развитие пожаров на самолетах и вертолетах. Анализ статистики аварий и катастроф пассажирских самолетов и вертолетов показывает, что значительная часть их приходится на долю пожаров. Причем большинство аварий и катастроф, как правило, сопровождается пожарами и взрывами, что приводит к гибели людей и летательного аппарата.



Тенденция развития современной авиации направлена на увеличение скорости и дальности беспосадочного полета и увеличение количества пассажиров. Уже сейчас на авиалиниях мира эксплуатируются самолеты, перевозящие 350-400 пассажиров; имеются проекты авиалайнеров на 1000 пассажиров. Аварии и катастрофы на таких авиалайнерах представляют угрозу для жизни большого количества людей, поэтому повышению безопасности полетов и выживаемости пассажиров при авариях и катастрофах на самолетах гражданской авиации придается первостепенное значение.

Причинами пожара на самолете могут быть:

течь топлива при разрушении трубопроводов высокого давления, течь в гидросистеме или маслосистеме самолета;

разрушение двигателя, обрыв лопаток турбины, прогар камеры сгорания и т.п.;

разрушение трубопроводов системы обогрева и кондиционирования;

взрыв топливных баков в результате удара молнии в самолет;

различные механические воздействия - удар конструкции самолетов и вертолетов при столкновении с преградами, при грубой посадке, особенно при посадке с убранными шасси, боевое поражение и т.п.

Все пассажирские самолеты оснащены эффективными бортовыми автоматическими средствами тушения пожара, которые предназначены для ликвидации пожара во внутренних отсеках самолета, возникшего в полете и вызванного отказами в работе основных систем самолета. Пожары, возникшие на земле, вне конструкции самолета ликвидируются наземными средствами тушения.

Пожароопасными отсеками на самолетах и вертолетах являются;

отсеки топливных баков;

отсеки силовых установок;

багажный и технический отсеки;

шасси;

отсек редуктора несущего винта - у вертолета.

Наибольшую пожарную опасность представляют отсеки топливных баков, запас топлива в которых на современных самолетах достигает 50-100 т.

В качестве топлива применяется керосин с температурой вспышки около 30°C. Особенно опасными являются пожары, вызванные разрушением топливных баков при взлете или посадке.

Топливо разбрызгивается на значительное расстояние, площадь пожара достигает нескольких сотен квадратных метров (400-500 м<sup>2</sup> и более) в течение 1-2 мин.

Огнестойкость конструкции самолетов и вертолетов очень маленькая. За 2-3 мин огонь может привести к необратимым изменениям в конструкции самолета и к его разрушению. Поэтому при ликвидации пожара в первую очередь необходимо принять меры к эвакуации людей, защите фюзеляжа самолета и крыльевых топливных баков от действия огня. Пожары могут сопровождаться взрывами топливных баков.

Обстановка особенно усложняется, если пожар на самолете происходит при работающих двигателях. В этом случае необходимо принять меры к их выключению путем подачи огнетушащих составов во входное устройство двигателей или путем механического прекращения подачи топлива к ним. Наземные пожары в отсеках силовых установок менее опасны, чем пожары пролитого топлива, так как горючие жидкости в них находятся в меньших количествах, горение происходит при ограниченном газообмене, конструктивные материалы более огнестойки по сравнению с другими отсеками. Прекращение горения достигается перекрытием дроссельного и пожарных кранов двигателя и подачей огнетушащих средств в подкапотное пространство. Наименее опасным для конструкции самолета является пожар внутри двигателя, вызванный неплотным прикрытием дроссельного крана, так как внутренние полости двигателей выполнены из жаропрочных сплавов. Для тушения необходимо поставить сектор газа в положение "Стоп", перекрыть пожарный кран и сделать холодную прокрутку двигателя.

Пожары в багажных и технических отсеках развиваются менее интенсивно, чем в других. Они сопровождаются задымлением отсеков и проникновением дыма и продуктов пиролиза в пассажирский салон и кабину пилотов, так как они имеют общую систему вентиляции. При тушении таких пожаров необходимо принять экстренные меры к эвакуации людей. Интенсификации развития пожаров в технических отсеках могут способствовать взрывы сосудов высокого давления (гидроаккумуляторов, кислородных баллонов и т.п.), разрушения аккумуляторов. Пожары в багажных и технических отсеках могут быть ликвидированы экипажем ручными огнетушителями. Для подачи огнетушащих составов в полу пассажирского салона предусмотрены специальные люки. Кроме того, в них могут подаваться огнетушащие составы от наземных средств тушения через люки, находящиеся снаружи самолета.

Пожары шасси, вызванные перегревом тормозных колодок при резком торможении самолета, являются наименее опасными, так как мала вероятность переброса пламени на фюзеляж самолета. Для их ликвидации требуется наименьшее количество огнетушащих средств.

Эвакуация людей из горящего самолета производится через специальные двери и люки, однако при аварии их может заклинить, поэтому на современных самолетах предусмотрены места для вскрытия обшивки самолета.

Развитие пожаров на железнодорожном и шоссейном транспорте. Причины пожаров на железнодорожном транспорте примерно аналогичны причинам пожаров на судах. Процесс горения в купе железнодорожного вагона сопровождается сильным задымлением, которое по системе вентиляции проникает в смежные помещения. Скорость роста температуры в купе будет определяться мощностью источника зажигания, его расположением относительно пожарной нагрузки, пожарной нагрузкой, ее физико-химическими свойствами и газообменом. Большое влияние на характер развития пожара будет оказывать газообмен; например, пожар в купе при приоткрытом окне, открытой двери в коридор и открытых одном-двух окнах в коридоре будет существенно отличаться от пожара в купе при закрытых окне и двери.

На шоссейном транспорте наиболее опасными являются пожары с разливом горючих жидкостей вокруг транспортных средств, так как возрастает вероятность попадания и воспламенения их внутри пассажирского салона. Неисправности топливной системы вызывают пожар в моторном отсеке, который обнаруживается визуально на ранней стадии. В этом случае эвакуация людей из салона может быть произведена раньше, чем пламя распространится на него.

## Глава 7

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИЗМОВ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ

#### § 7.1. Эффективное тушение пожаров как последняя мера обеспечения пожарной безопасности

При возникновении пожара перед специалистами пожарной охраны встает вопрос, как локализовать и ликвидировать его, т.е. свести к минимуму размеры его путем ограничения зон

распространения пожара, снизить возможную скорость его распространения даже в тех пределах, где нет ограничений по площади его развития; снизить интенсивность процесса горения и особенно снизить возможную плотность задымления и допустимые зоны задымления, для обеспечения безопасной эвакуации людей и облегчения условий борьбы с пожаром. Это достигается различными путями и средствами: строительными нормами и правилами; ограничениями по допустимым совмещениям различных видов пожарной нагрузки; конструктивно-планировочными решениями и специальными техническими устройствами (огнестойкие двери; двери с дожимателями; вентиляционные люки и каналы; принудительная вентиляция, создающая подпор воздуха в определенном направлении и обеспечивающая незадымляемость лестничных клеток и путей эвакуации людей при пожаре и т.д.). И, наконец, это достигается активно действующими системами автоматической подачи огнетушащих средств, локализующими пожар в зоне его возникновения, или, по крайней мере, ограничивающими скорость его распространения. Для успешного решения всех этих вопросов необходимо знать законы горения и физико-химические основы развития пожаров в зависимости от их вида, режима горения, условий и специфических особенностей объекта пожара.

Основной боевой задачей личного состава пожарной охраны является защита жизни и здоровья людей от пожара, ликвидация пожара в тех размерах, которые он принял к моменту прибытия подразделений пожарной охраны и сохранение материальных ценностей от их повреждения или уничтожения огнем. Эта задача должна решаться наиболее эффективными приемами и способами, в кратчайшее время, с расчетно обоснованными силами и средствами, с минимальным побочным (дополнительным) ущербом, наносимым в процессе тушения пожаров.

Достичь этого можно только при условии применения научно обоснованных приемов и способов тушения пожара, правильным определением решающего направления на пожаре, умелой организацией тушения, выбором наиболее эффективных огнетушащих средств и оптимальной интенсивности их подачи и др.

Таким образом без знания физико-химических основ развития и тушения пожаров невозможно ни правильное проектирование и применение автоматических систем сигнализации о пожаре и автоматических систем пожаротушения, ни разработка тактических приемов и способов тушения пожаров, ни проектирование пожарной техники для реализации наиболее эффектив-

ных способов тушения пожаров силами и средствами пожарной охраны.

В то же время правильно и хорошо организованная оперативная служба пожаротушения является одним из радикальных путей борьбы с пожарами и последним звеном в цепи средств, призванных обеспечивать пожарную безопасность. В некоторых частных случаях этот путь является даже наиболее целесообразным. Однако возведение его в принцип - чревато серьезными ошибками, связанными с тяжелыми социальными и экономическими последствиями. Примером порочности такого пути осуществления пожарной безопасности в стране, когда тушение уже возникших пожаров считается главным способом борьбы с пожарами, является многолетний опыт деятельности пожарной охраны Соединенных Штатов Америки.

Имея первоклассную пожарную технику, хорошо налаженную систему оповещения, отличную боевую подготовку пожарных подразделений, США в то же время вышли на первое место в мире по числу жертв от пожаров и размерам материального ущерба \*. Причину этого пожарные специалисты США видят в том, что 95% материальных средств, расходуемых на противопожарную безопасность в штатах тратится на тушение уже возникших пожаров и только 5% - на их предупреждение.

Тем не менее, эффективные приемы и способы тушения пожаров, хорошо организованная служба пожаротушения безусловно являются важным звеном в обеспечении пожарной безопасности.

---

\* Закон о снижении жертв и убытков от пожаров путем улучшения профилактики и тушения пожаров". (Закон 33-498 конгресса Соединенных Штатов Америки). Ежегодное среднестатистическое число человеческих жертв со смертельным исходом от пожаров в США примерно в 2-2,5 раза выше, чем в нашей стране, что в пересчете на миллион жителей примерно в 3-3,5 раза больше, чем в Советском Союзе. А среднестатистический размер ежегодного материального ущерба от пожаров в США примерно в 15-20 раз выше, чем в нашей стране. Возможно, отчасти, это объясняется различиями в методах оценки величины материального ущерба. Но качественно картина очевидна. Одностороннее предпочтение оперативных методов борьбы с пожарами не может дать положительных результатов.

## § 7.2. Тушение пожара как осуществление физического процесса

Потушить пожар, с физической точки зрения означает, прежде всего, прекратить процесс горения во всех видах, т.е. создать в зоне горения условия, исключающие возможность продолжения процесса горения в любой форме (пламенного горения, беспламенного гетерогенного горения, тления и т.п.). Анализ этих условий удобнее начать методом "от противного", т.е. с анализа условий "необходимых и достаточных" для горения на пожаре, имея в виду, главным образом диффузионный процесс горения.

Качественно эти условия "необходимые и достаточные" можно представить в виде мнемонической схемы "классического треугольника пожара": горючее-окислитель-источник зажигания (рис. 7.1).

При такой схеме достаточно "оборвать" одну из связей в треугольнике и горение станет невозможным, а тем более если "отсечь" один из углов треугольника. Действительно, если исключить из треугольника пожара, например, горючий материал, т.е. изолировать горючее от зоны горения, пожар прекратится. Если изолировать окислитель, т.е. полностью прекратить доступ воздуха в зону горения, диффузионное горение прекратится. Точно также, если исключить источник зажигания (при неразвившемся горении, в начальной стадии пожара источником зажигания чаще всего является сама зона горения, т.е. факел пламени), то горение также прекратится.

Простейшим примером тушения пожара методом "изъятия горючего", т.е. путем "отсечения одного из углов треугольника пожара", является тушение пожара, связанного с горением горючего газа или ЛВЖ, ГЖ на технологической установке, путем закрытия вентиля на магистральном трубопроводе или прекращения течи горючего какими-либо другими способами (в тех случаях, когда это возможно). Другим примером тушения пожара, "отсечением одного из углов треугольника пожара" или разрывом связей в этом треугольнике, является тушение пожаров на резервуарах с ЛВЖ, ГЖ малых размеров, путем покрытия их металлическим листом, кошмой, асбестовым полотном или мокрым брезентом и т.д. (когда это возможно по геометрическим размерам резервуара и условиям боевой обстановки на пожаре). Тушение пожаров в резервуарах с ЛВЖ, ГЖ методом перемешивания или изолирующими пенами - тоже в конечном счете изъятие горючего материала из зоны горе-

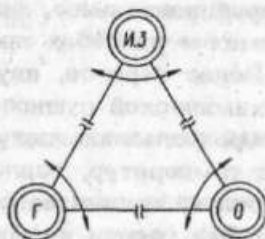


Рис. 7.1. Схема "классического треугольника пожара"

ния, т.е. "отсечение угла" или разрыв связей в треугольнике пожара. Применение этого метода возможно даже на пожарах, связанных с горением твердых горючих веществ и материалов.

Так, например, разборка горящих конструкций или растаскивание штабеля древесины тоже является своего рода, условно, "изъятием" горючего материала из зоны горения и отсечением одного из углов классического треугольника пожара. Очевидно, что возможны и многие другие примеры. Например, закрытие доступов воздуха в помещение, применяемое иногда при тушении пожаров в подвалах и туннелях, в шахтах и трюмах судов, есть частный случай "изъятия окислителя" из треугольника пожара, также нередко приводящий к прекращению горения. Таким образом можно прекратить только пламенное диффузионное горение (ниже 14-15% кислорода), а беспламенное горение и тление, идущие при более низких концентрациях кислорода (5-6%  $O_2$ ) будет продолжаться. Нужно помнить, что при открытии помещения и интенсивном доступе свежего воздуха с высоким содержанием кислорода, могут привести к внезапному воспламенению и даже к взрыву накопившихся там газообразных горючих продуктов неполного сгорания.

Наглядной иллюстрацией механизма прекращения горения пламени методом отсечения третьего угла у треугольника - методом изоляции источника зажигания от горючей смеси - может служить опыт по тушению диффузионного пламени газовой горелки теплоемкой металлической сеткой, которая вводится в мертвую зону под диффузионное пламя, а затем поднимается вверх до полного отрыва факела пламени от устья горелки.

Почти таков же в основном механизм тушения газовых фонтанов с помощью взрыва над устьем фонтана заряда ВВ (в "мертвой зоне" факела пламени). Факел пламени на какое-то время отделяется от свежей горючей смеси и горение прекра-

щается. Но это только приблизительное, чисто качественное представление о механизмах и способах прекращения процессов горения на пожаре. Более строгое, научно обоснованное представление о физико-химической сущности и механизме прекращения процессов горения можно получить из анализа структуры пламени, поля температур, тепловых и кинетических процессов в зоне горения, приняв за основу тепловую модель механизма горения. Эта теория называется тепловой теорией потухания пламени. Она разработана советскими учеными, в частности, академиком Я.Б. Зельдовичем, профессорами Д.А. Франк-Каменецким, Л.А. Вулисом, В.И. Блиновым и другими и находит все более широкое применение в пожарно-технической литературе и практике пожаротушения.

### § 7.3. Тепловая теория потухания пламени

Наиболее распространенной научно обоснованной теорией прекращения процессов горения является тепловая теория потухания пламени или тепловая теория прекращения горения. Суть ее сводится к тому, что при нарушении условий теплового равновесия в зоне протекания химических реакций горения самопроизвольное и непрерывное течение этих реакций становится невозможным и процесс горения прекращается. Это происходит тогда, когда в результате нарушения теплового равновесия в зоне протекания химических реакций горения температура снизится до некоторого критического значения  $T_{кр} = T_{пл} - \Delta T$ . Из анализа выражения для массовой скорости выгорания при диффузионном горении предварительно перемешанных газов, которая возрастает с увеличением интенсивности подачи горючих компонентов в зону горения, в работе Я.Б. Зельдовича [15], получена максимально возможная величина снижения температуры пламени (до момента срыва пламени):

$$\Delta T_{ад} = \frac{3R T_{ад}^2}{E}, \quad (7.1)$$

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

Подставив численные значения входящих величин, получим величину критической температуры пламени или теоретической температуры потухания:



$$T_{\text{пот}} \approx T_{\text{ад}} - \frac{3R T_{\text{ад}}^2}{E} = 2300 - \frac{3 \cdot 2 \cdot 529 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^4} \approx 1240 \text{ K},$$

т.е. температура потухания пламени равна приблизительно  $1000^\circ\text{C}$ .

Температура кинетического пламени значительно меньше адиабатической  $T_{\text{кин}} < T_{\text{ад}}$  из-за теплопотерь из зоны горения на излучение пламени. В диффузионных пламенах, которые наиболее часто встречаются на пожаре, доля тепловых потерь на излучение значительно больше. Во-первых, потому, что у диффузионных пламен выше светимость из-за наличия в них твердых частиц углерода. Углерод образуется в предпламенной зоне прогрева углеводородных горючих при недостатке кислорода. В кинетическом пламени такой нагрев давал бы окисление углерода до  $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$ , а в диффузионном — приводит к образованию свободного углерода  $\text{C}$ , коагулирующего до твердых сажистых частиц значительных размеров, резко увеличивающих светимость диффузионных пламен. Это приводит и к увеличению теплопотерь от диффузионного факела пламени излучением и к снижению интенсивности тепловыделения из-за неполноты сгорания, так как углеродные частицы не успевают сгорать до  $\text{CO}$  или  $\text{CO}_2$  из-за недостатка кислорода. Во-вторых, при диффузионных пламенах больше зона реакции и, соответственно — больше поверхность излучения пламени и ниже интенсивность тепловыделения на единицу объема зоны реакции. В-третьих, при диффузионном горении больше удельная величина тепловых потерь от факела пламени за счет конвективного теплообмена зоны горения с окружающим пространством. В сумме эти потери для диффузионных пламен составляют до 40% от всего количества тепла, выделяющегося в зоне горения.

Поэтому реальная температура диффузионного пламени получается примерно на 40–45% ниже  $T_{\text{ад}}$ , соответствующей нижней теплоте сгорания углеводородных горючих веществ и материалов. Принимая условно среднюю теплоемкость газов в зоне пламени постоянной  $c_p$ , можно записать, что в расчете на единицу массы горючего вещества  $T_{\text{ад}} = T_0 + \Delta T_{\text{ад}}$ , где  $\Delta T_{\text{ад}}$  — повышение температуры в зоне горения за счет выделения теплоты химических реакций горения  $\Delta T_{\text{ад}} \sim \frac{Q_{\text{H}}}{c_p}$  или

$$T_{\text{ад}} \sim T_0 + \frac{Q_{\text{H}}^p}{c_p} = 2300 \text{ K},$$

где  $T_0 = 300$  К, откуда  $\frac{Q_H^P}{c_p} \sim 2000$  К.

Если количество тепла, идущего на повышение температуры среды в зоне пламени за вычетом теплопотерь, в расчете на единицу массы горючего обозначить  $Q_{пл}$ , то можно записать, что  $Q_{пл} = Q_H^P - \Delta Q_{пот}$ , где  $\Delta Q_{пот}$  составляет примерно 40% от всего выделившегося в факеле пламени тепла, т.е.  $\Delta Q_{пот} \sim 0,4 Q_H^P$ . Откуда  $Q_{пл} \sim 0,6 Q_H^P$ . Тогда, соответственно,

$$T_{пл} = T_0 + \Delta T_{пл} = T_0 + \frac{Q_{пл}}{c_p} \approx T_0 + \frac{0,6 Q_H^P}{c_p};$$

$$T_{пл} \approx 300 + 1200 \approx 1500 \text{ К.}$$

Эта величина температуры факела диффузионного пламени  $t_{пл} \approx 1200^\circ\text{C}$  довольно хорошо согласуется с результатами экспериментальных данных  $t_{пл} = 1100 \div 1300^\circ\text{C}$ .

Следовательно, для того чтобы снизить температуру в зоне горения до температуры потухания, равной 1250 К, температуру факела диффузионного пламени в условиях пожара надо понижать не на три характеристических интервала температур  $\frac{3RT_{ад}^2}{E} \sim 1060$  К, а всего на  $150 \div 200$  К, что соответствует интервалу температур  $\Delta T_{пл} = \frac{RT_{пл}^2}{E}$ , так, как при  $t_{пл}^{\min} \approx 1100^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{пл} \approx 130$  К, что соответствует  $T_{пот} \approx T_{пл} - \Delta T_{пл} \approx 1400 - 130 \approx 1270$  К (т.е.  $t_{пот} \approx 1000^\circ\text{C}$ ), а при  $t_{пл}^{\max} \approx 1200^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{пл} \approx 150$  К; что соответствует  $T_{пот} \approx T_{пл} - \Delta T_{пл} \approx 1500 - 150 \approx 1350$  К (т.е.  $t_{пот} \approx 1050^\circ\text{C}$ ).

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

Нарушение теплового равновесия в зоне химических реакций горения можно осуществить либо снижением интенсивности тепловыделения в зоне реакции, ниже некоторого предельного значения, при котором невозможно самопроизвольное непрерывное продолжение реакций горения, либо повышением интенсивности теплоотвода, либо одновременно снижением интенсивности тепловыделения и повышением интенсивности теплоотвода до тех пор, пока температура в зоне химических реакций не снизится до температуры потухания. Аналитически

интенсивность процесса тепловыделения во фронте пламени в зависимости от вида горючего, его концентрационного состава и температуры пламени выражается через скорость химических реакций уравнением вида:

$$q_1 = q_0 w^V = q_0 V K_0 c_1^{\nu_1} c_2^{\nu_2} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (7.2)$$

Интенсивность суммарного процесса теплоотвода от фронта пламени по механизму лучистой теплопередачи и передачи тепла конвекцией описывается уравнением вида:

$$q_2 = \epsilon \sigma S (\bar{T}_{\text{пл}}^4 - \bar{T}_{\text{окр}}^4) + aS(T_{\text{пл}} - T_{\text{окр}}) \quad (7.3)$$

Приравнявая правые части выражений (7.2) и (7.3) и решая полученное трансцендентное уравнение относительно  $T_{\text{пл}}$ , можно найти температуру пламени. Однако строгое аналитическое решение этого уравнения представляет значительные трудности. Графически, температуру диффузионного пламени, как результат динамического равновесия процессов тепловыделения и теплоотвода во фронте пламени можно найти и как численное значение проекции точки пересечения кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  на ось абсцисс (рис. 7.2, точка 1). В точке пересечения кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  величины  $q_1$  и  $q_2$  всегда равны между собой.

При нарушении условий тепловыделения в зоне горения за счет каких-либо внешних причин (например, при снижении интенсивности тепловыделения в пламени за счет изменения концентрационного состава горючей смеси) кривая  $q_1' = f(T)$  пойдет ниже (см. пунктирную S-образную кривую) и температура во фронте пламени снизится до нового равновесного значения  $T_{\text{пл}}'$ , соответствующего точке 2.

При нарушении условий теплоотвода от пламени (например, повышение его интенсивности за счет снижения окружающей температуры), температура во фронте пламени вновь понизится до  $T_{\text{пл}}''$ , соответствующей пересечению кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2' = f(T)$  в точке 3.

Если нарушение теплового баланса происходит одновременно за счет снижения интенсивности тепловыделения во фронте пламени и повышения интенсивности отвода тепла от него, то кривые  $q_1' = f(T)$  и  $q_2' = f(T)$  пересекутся в новой точке 4, лежащей еще левее, чем точки 1 - 3. А температура пламени будет равна  $T_{\text{пл}}'''$ .

Изменяя и дальше условия тепловыделения (снижая его ин-

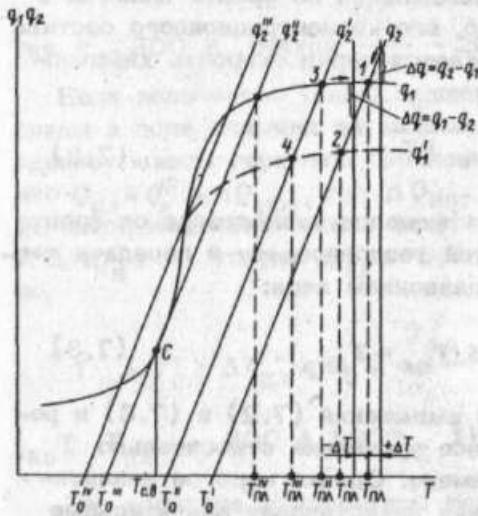


Рис. 7.2. Изменение скорости выделения и отвода тепла в зоне реакции в зависимости от температуры

тенсивность) и теплоотвода (повышая его интенсивность), можно довести систему до состояния, соответствующего критическим условиям самовоспламенения исходных компонентов горючей смеси. При этом температура самовоспламенения будет соответствовать точке касания кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  и равна  $T_{CB}$ , а температура

возникшего пламени будет соответствовать точке пересечения кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  и равна  $T_{пл}^{IV}$ .

Снижая дальше интенсивность тепловыделения или повышая интенсивность теплоотвода, можно перевести систему в новое положение, соответствующее рис. 7.3. Для простоты изложения будем только повышать интенсивность теплоотвода путем снижения окружающей температуры, т.е. передвигать кривую  $q_2 = f(T)$  влево параллельно самой себе. Таким способом можно достичь такого положения, когда кривые  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  будут иметь три точки пересечения (рис. 7.3). Точка *a* лежит в области низких температур, ниже температуры самовоспламенения ( $T_a < T_{CB}$ ) и не представляет собой особого интереса с точки зрения процесса горения. Это область стационарных процессов медленного окисления. Точка *b* лежит выше температуры самовоспламенения ( $T_b > T_{CB}$ ) и характеризует неустойчивое состояние. При малейшем снижении температуры в точке *b* (смещение по стрелке влево вниз) система перейдет в состояние в точке *a* и горения не произойдет; а при незначительном повышении температуры в точке *b* (смещение по стрелке вправо вверх) система перейдет в устойчивое состояние в точке *d* и температура пламени  $T_d$  будет выше, чем в точке *II*  $T_{II}$ , и пламя не погаснет, а его температура будет соответствовать значению  $T_d > T_{II}$ .

Продолжая путем внешнего воздействия на зону горения повышать интенсивность теплоотвода от фронта пламени (или

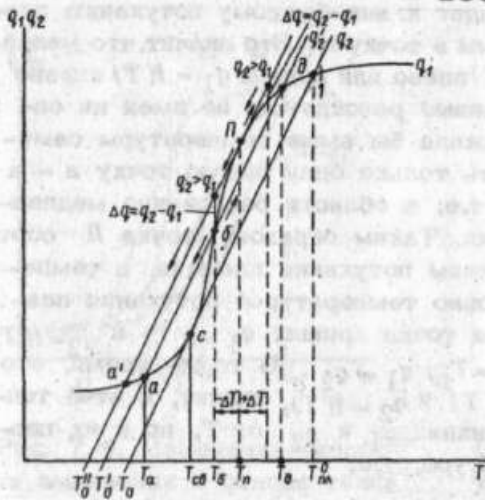


Рис. 7.3. Изменение скорости выделения и отвода тепла в зоне реакции в зависимости от температуры (увеличение теплоотвода за счет уменьшения температуры окружающей среды)

снижением интенсивности тепловыделения или одновременным изменением обоих этих процессов), переведем систему в новое состояние, когда кривые  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$  имеют только две общих точки: точку пересечения  $a$  в области низких температур и точки  $\Pi$  — точку касания кривых. В точках пересечения и в точках касания кривых, значения  $q_1$  и  $q_2$  равны друг другу. Проведем анализ состояния системы в точке  $\Pi$  методом малых возмущений. Снижим температуру системы на незначительную величину  $\Delta T$ , т.е. сместимся влево от точки  $\Pi$ . При этом кривая интенсивности теплоотвода  $q_2 = f(T)$  идет выше  $q_1 = f(T)$  и система за счет ее охлаждения в результате нарушения теплового баланса перейдет из точки  $\Pi$  в точку  $a$  ( $q_1 = q_2$ ), т.е. процесс горения прекратится.

Теперь, наоборот, повысим температуру системы в точке  $\Pi$  на незначительную величину  $\Delta T$ , т.е. сместимся вправо вверх от точки  $\Pi$ . В этом случае значение функции теплоотвода  $q_2 = f(T)$  опять больше, чем функции  $q_1 = f(T)$  т.е. теплоотвод интенсивнее тепловыделения (кривая  $q_2$  идет выше, чем  $q_1$ ) и температура системы вновь понизится, возвращая ее в точку  $\Pi$ . Значит, в точке  $\Pi$  система находится в относительно устойчивом положении, при котором повышение температуры системы ведет к ее стабилизации и возврату системы в прежнее состояние, а малейшее понижение температуры (повышение интенсивности теплоотвода или снижение интен-

сивности тепловыделения) ведет к неизбежному потуханию пламени (т.е. к возврату системы в точку  $a'$ ). Это значит, что малейшее смещение кривой  $q_2 = f(T)$  влево или кривой  $q_1 = f(T)$  вправо приведет к тому, что эти кривые разойдутся, не имея ни одной общей точки, которая лежала бы выше температуры самовоспламенения, и будут иметь только одну общую точку  $a$  - в области низких температур, т.е. в области бесконечно медленного беспламенного окисления. Таким образом, точка  $\Pi$  соответствует критическим условиям потухания пламени, а температура  $T_{\Pi}$  называется условно температурой потухания пламени. Точка  $\Pi$  есть общая точка кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$ , значит, в этой точке при  $T = T_{\Pi}$ ;  $q_1 = q_2$ . В то же время, это точка касания кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$ , значит, в этой точке равны не только сами функции  $q_1$  и  $q_2$  от  $T$ , но и их первые производные по температуре, т.е.

$$\left(\frac{dq_1}{dT}\right)_{T_{\Pi}} = \left(\frac{dq_2}{dT}\right)_{T_{\Pi}}$$

Тогда, аналитически, условие потухания пламени запишется так:

$$q_1(T_{\Pi}) = q_2(T_{\Pi}); \quad \left(\frac{dq_1}{dT}\right)_{T_{\Pi}} = \left(\frac{dq_2}{dT}\right)_{T_{\Pi}}$$

или

$$q_0 V K c^{\nu_1} c^{\nu_2} e^{-\frac{E}{RT_{\Pi L}}} = a_{\text{пр}} S (T_{\Pi L} - T_{\text{окр}}).$$

Независимо от того, каким образом будет осуществляться снижение температуры пламени до температуры потухания, процесс пламенного горения прекратится.

Снижения температуры в зоне горения до температуры потухания можно добиться и при меньших интенсивностях теплоотвода от пламени (рис. 7.4). Кривая  $q_1' = f(T)$  идет правее и ниже, чем  $q = f(T)$ , которая была бы касательной к функции  $q_2'' = f(T)$ , если бы интенсивность тепловыделения не снижалась. Из графика (рис. 7.4) видно, что тушение пламени в этом случае возможно при менее интенсивном теплоотводе. Кривая  $q_2' = f(T)$  идет правее и ниже кривой  $q_2'' = f(T)$ , а также при более высокой температуре окружающей среды ( $T_{\Pi} > T_{\Pi}'$ ). Температура потухания  $T_{\Pi}$  не является строго постоянной величиной, а зависит от соотношения, вида и взаиморасположения кривых  $q_1 = f(T)$  и  $q_2 = f(T)$ , т.е. от законов изменения интен-

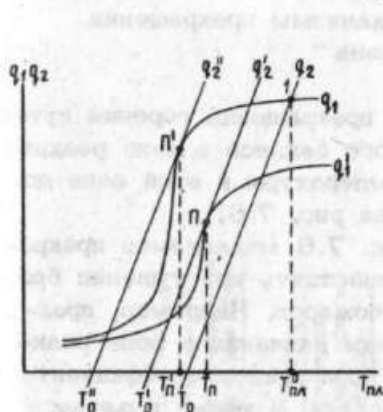


Рис. 7.4. Изменение скорости выделения и отвода тепла в зоне реакции в зависимости от температуры (уменьшение скорости тепловыделения)

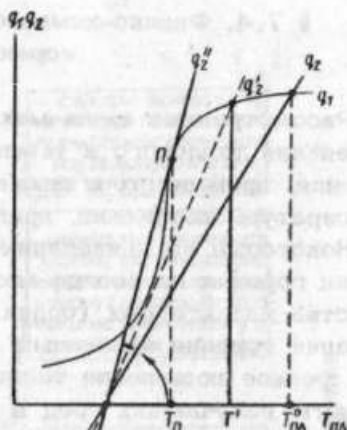


Рис. 7.5. Изменение скорости выделения и отвода тепла в зоне реакции в зависимости от температуры (увеличение скорости теплоотвода)

сивности тепловыделения и теплоотвода. Температура потухания  $T_{п} = 1000^{\circ}\text{C}$  выше температуры самовоспламенения\*. Это справедливо и для случая, когда одновременно со снижением интенсивности тепловыделения в факеле пламени  $q_1 = f(T)$  и повышением интенсивности теплоотвода более интенсивное охлаждение зоны горения будет осуществляться не только за счет снижения окружающей температуры  $T_{окр}$ , а и за счет повышения коэффициента теплопередачи  $\alpha$  или степени черноты пламени  $\epsilon$ , или их обеих вместе.

Повышение интенсивности теплоотвода от пламени будет выражаться графически не только путем смещения кривой  $q_2 = f(T)$  влево, а и одновременным увеличением ее угла наклона (кривая  $q_2'' = f(T)$  пойдет круче по отношению к оси абсцисс). График такого процесса показан на рис. 7.5. При повышении коэффициента теплопередачи  $\alpha$  (что соответствует одновременно и большему углу наклона кривой  $q_2 = f(T)$ ) гашение пламени возможно при более высокой окружающей температуре.

\* Это явление в физике горения известно под названием гистерезисного характера процессов воспламенения и потухания.

#### § 7.4. Физико-химические механизмы прекращения горения пламени

Рассмотренные выше механизмы прекращения горения путем изменения теплового и температурного баланса в зоне реакции горения, приводящих к снижению температуры в этой зоне до температуры потухания, приведены на рис. 7.6.

Некоторые из приведенных на рис. 7.6 механизмов прекращения горения не всегда можно осуществить при тушении большинства характерных (ординарных) пожаров. Например, прекращение горения внезапным снижением давления в зоне реакции, резкое повышение теплоотвода повышением коэффициента черноты излучающих сред в зоне реакции, а также изъятие, внезапное физическое отделение всех источников зажигания горючей смеси в зоне реакции. Но в некоторых частных случаях каждый из них может быть применен.

Скорость химической реакции зависит от числа эффективных соударений молекул горючего и окислителя. А количество этих соударений — прямо пропорционально числу молекул в единице объема зоны реакции. Поэтому интенсивность процесса горения зависит от давления. Для интенсификации процессов горения в различных технических устройствах, камерах сгорания, топках, технологических установках — повышают давление. При снижении давления интенсивность диффузионного горения снижается. А снизив давление до определенного значения, можно настолько уменьшить число молекул в единице объема зоны реакции, что горение прекратится.

В физике горения известны не только концентрационные пределы горения, но и пределы горения по давлению. Для большинства углеводородных горючих веществ они близки к 0,1 атм. (В специальных устройствах удается поддерживать горение и при значительно более низких давлениях, почти до 0,01 атм, т.е. до 7 мм рт.ст., но для прекращения диффузионного горения достаточно понизить давление до  $p = 0,4-0,5$  атм). При таком разрежении скорость тепловыделения резко уменьшится, температура в зоне реакции понизится до  $T_{II}$  и горение прекратится. Таким способом внезапного разрежения можно прекратить горение в некоторых технологических установках и аппаратах, а также при пожарах в пилотских кабинах, в пассажирских салонах самолетов, в кабинах космических кораблей и на орбитальных станциях при космических полетах.

При горении некоторых горючих материалов (например, водорода, магния) температура пламени очень высока и количеств-



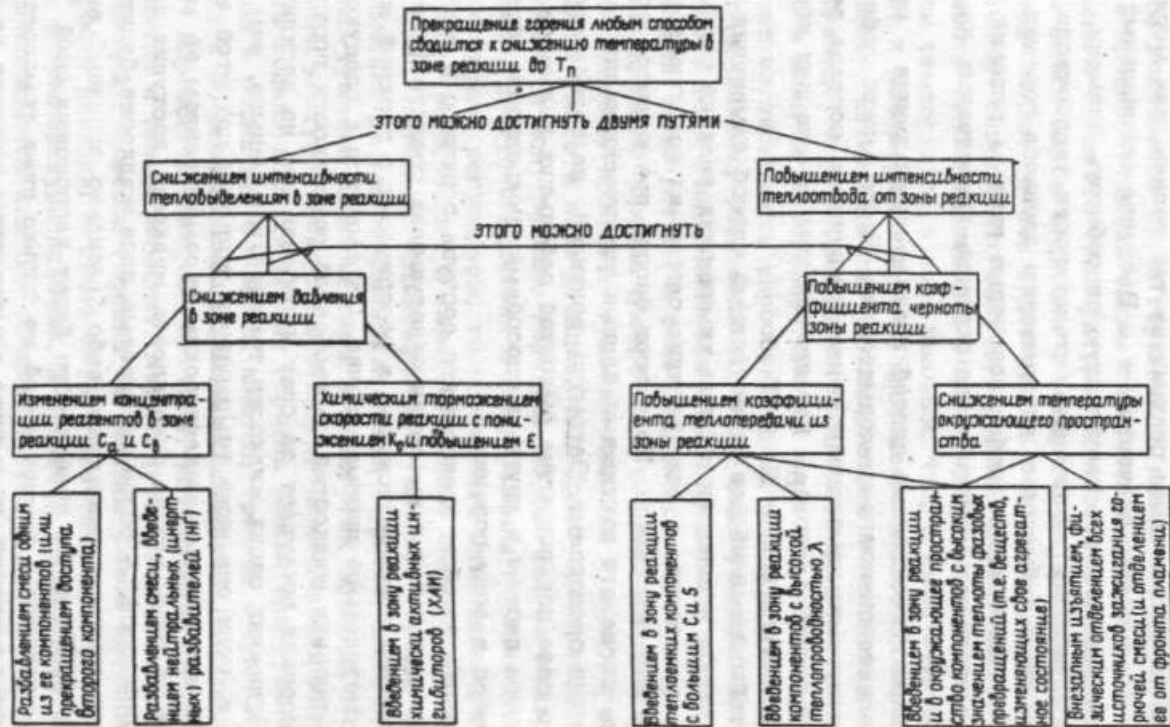


Рис. 7.6. Механизмы прекращения горения

во отводимого из зоны горения тепла должно быть очень большое (так как  $q_2'' = \epsilon \sigma (T_{\Gamma}^{-4} - T_x^{-4})$ ), но эти пламена, как правило, бесцветны и коэффициент их черноты очень низкий. Поэтому теплопотери из зоны реакции не так велики, как могли бы быть при больших значениях  $\epsilon$ . Введение специальных добавок в пламя повысит излучающую способность пламени, приведет к резкому увеличению интенсивности теплоотвода из зоны реакции и к быстрому прекращению процесса горения.

Рассмотрим более подробно некоторые приемы тушения пламени по механизмам прекращения горения, приведенных на рис. 7.6.

Наиболее естественный способ прекращения горения — это снижение интенсивности тепловыделения. Этого можно добиться двумя путями: изменением концентрационного состава реагирующей смеси  $c_A$  и  $c_B$  или изменением химических констант скорости реакции  $K$  и  $E$ .

Простейший и наиболее естественный способ изменения состава смеси в зоне протекания химических реакций горения — прекращение доступа в зону реакции одного из компонентов: горючего или окислителя. Но и этот способ применяется только тогда, когда это достижимо одними техническими или механическими средствами. Закрытие вентилей на трубопроводах горючего газа или покрытие емкостей небольших размеров металлическим листом и другими способами прекращения доступа горючего в зону горения.

Частным способом прекращения доступа горючего в зону реакции горения без применения огнетушащих средств (составов) является тушение пожаров в резервуарах с горючей жидкостью методом ее перемешивания. Он сводится к следующему. При горении жидкостей со свободной поверхности горючее в зону горения поступает за счет испарения его из верхних слоев. В нижних слоях жидкости температура меньше, чем в верхних и, если она ниже температуры вспышки для этой жидкости, то интенсивным механическим перемешиванием ее можно добиться того, что на поверхность жидкости поступят холодные нижние слои. А более разогретые слои жидкости будут либо перемешаны и охлаждены, либо "наильно загнаны" вниз (временно). Тогда на поверхности будет расположен слой "холодной" жидкости с температурой не только ниже температуры ее воспламенения, но и ниже температуры вспышки ее паров. При этой температуре упругость и парциальное давление паров незначительно, т.е. количество паров недостаточно для

создания над поверхностью жидкости горючей паровоздушной смеси. Поэтому в зоне горения перестанет поступать необходимое количество паров горючего и пламя погаснет. В динамике процесс тушения таким способом выглядит так. При постепенном снижении температуры жидкости в поверхностном слое смесь паров жидкости с воздухом над резервуаром "обедняется" горючим, она будет разбавлена окружающим воздухом настолько сильно, что скорость реакции резко упадет, интенсивность тепловыделения в зоне горения уменьшится и понизится температура в зоне реакции, что, в свою очередь, приведет к понижению скорости протекания химической реакции. Снижение интенсивности тепловыделения и температуры пламени приведет к уменьшению интенсивности теплового потока от факела пламени к зеркалу горючей жидкости. Это еще больше снизит интенсивность парообразования и поведет к дальнейшему разбавлению, обеднению горючим зоны реакции. Когда совокупность всех этих взаимосвязанных процессов приведет к снижению температуры в зоне реакции до температуры потухания, процесс горения прекратится и пламя погаснет.

В принципе возможно тушение пламени и переобогащением горючей смеси в зоне реакции, т.е. более интенсивной подачей горючего в зону реакции горения. Но так как на пожарах, как правило, доступ окислителя в зону реакции горения очень велик и трудно регулируем, то увеличение интенсивности подачи горючего не приведет к переобогащению смеси и тушению пожара, а, наоборот, интенсифицирует процесс горения за счет увеличения размеров факела пламени. Переобогащением возможно тушение пламени лишь в замкнутых объемах с ограниченным доступом воздуха в зону горения. Снизить интенсивность подачи воздуха в зону горения можно при тушении пожаров в подвалах, туннелях, шахтах, трюмах и т.п. Это приведет к обеднению зоны горения окислителем (или относительноному переобогащению ее горючим), интенсивность горения снизится и пламя погаснет. Характер изменения основных показателей процессов горения от состава смеси выглядит так: скорость реакции, а стало быть и интенсивность тепловыделения, и температура пламени, и скорость распространения пламени снижаются как при обеднении, так и при обогащении смеси, так как эти параметры имеют максимальное значение лишь в области стехиометрических концентраций состава горючей смеси либо вблизи этих концентраций.

Все другие способы тушения пламени, по какому бы механизму прекращения процесса горения они не осуществлялись,

так или иначе связаны с применением специальных огнетушащих средств (точнее — огнетушащих составов, вводимых в зону горения или в горючие компоненты).

Выбор огнетушащих средств и способов их введения в зону горения зависит от вида горючего вещества, режима его горения и ряда дополнительных обстоятельств.

#### § 7.5. Зависимость механизма прекращения горения от режима горения и агрегатного состояния горючих веществ

Механизм прекращения процессов горения на пожаре в значительной степени зависит от вида и режима горения, окружающих условий, исходного состояния горючего вещества и многих других факторов.

От предполагаемого механизма и способа прекращения процессов горения зависит выбор огнетушащего средства, способ его подачи в зону горения, требуемые количества огнетушащего средства и интенсивность его подачи и другие факторы, определяющие в конечном итоге эффективность и качество тушения того или иного вида пожаров.

Например, при кинетическом горении однородных, предварительно перемешанных газовых или парогазовых смесей в замкнутом объеме невозможен механизм тушения, путем изоляции одного из компонентов горючей смеси (так как смесь образовалась ранее, до момента ее воспламенения). Фронт пламени движется по горючей смеси самопроизвольно и остановить его можно только внешним воздействием: химическим торможением реакций горения во фронте пламени, экстренным введением химически активных ингибиторов, внезапным охлаждением фронта пламени (отводом тепла на теплоемком мелкоячеистом огнепреградителе). Если же кинетическое пламя стационарно (факел пламени "сидит неподвижно" на устье трубопровода, неплотности фланца и т.д.), то прекратить горение можно: изменением состава смеси (соотношения компонентов в смеси, если оно поддается регулированию); введением в состав горючей смеси нейтральных газов или химически активных ингибиторов; охлаждением факела пламени, введением охлаждающих средств в зону горения либо аэродинамическим срывом факела пламени. (Если нет постоянно действующих внешних источников повторного зажигания).

При диффузионном режиме горения существует больше механизмов прекращения горения: изоляция компонентов горючей

смеси друг от друга; введение огнетушащих средств в один из компонентов смеси; снижение интенсивности поступления одного из компонентов смеси в зону горения, а также охлаждение зоны горения и др.

Рассмотрим наиболее рациональные механизмы тушения в зависимости от исходного агрегатного состояния горючих веществ и материалов, при диффузионном горении (которое чаще всего встречается на пожаре). При диффузионном горении факела пламени на устье газового, газонефтяного или нефтяного фонтана, если нет возможности с помощью технических средств прекратить поступление горючего или изменить его состав введением в него огнетушащих средств, то единственный возможный способ тушения - это воздействие на факел пламени, так как прекратить доступ воздуха в зону горения факела пламени на фонтане или отток продуктов сгорания практически невозможно. При этом воздействовать на факел пламени можно различными механизмами прекращения горения.

Отрывом источника зажигания (факела пламени) от устья фонтана: взрывом ВВ; охлаждением факела пламени, введением в него теплоемких компонентов (воды, порошковых составов и др.); разбавлением концентрации реагентов в факеле пламени интенсивным введением нейтральных газов или еще лучше - химически активных ингибиторов или порошковых огнетушащих средств, обладающих свойством химического торможения реакций горения.

При тушении пожаров на фонтанах охлаждать горящее вещество практически бесполезно, так как горючие газы способны гореть при любой начальной температуре, а горючие жидкости в условиях фонтана распыляются так интенсивно, что охладить их ниже температуры вспышки почти невозможно. Поэтому охлаждать необходимо факел пламени, т.е. отводить тепло непосредственно из зоны горения. Это оказывается технически осуществимо потому, что при горении фонтана факел пламени имеет форму конуса с вершиной внизу, а основанием вверх, область зажигающего кольца находится в вершине конуса, т.е. внизу, поэтому достаточно прекратить пламенное горение одновременно в области "зажигающего" кольца (рис. 5,2) на непродолжительное время (на 1-2 с), чтобы горение прекратилось полностью и пожар был потушен (рис. 7,7). На рис. 7,7 показаны последовательные стадии тушения газового фонтана. При тушении протяженность зоны "зажигающего" кольца сужается (оно перемещается в пространстве), его мощность уменьшается, факел пламени перемещает-

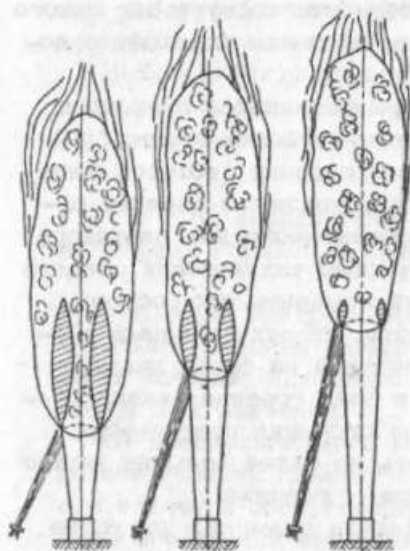


Рис. 7.7 Механизмы прекращения горения газового фонтана

ся вверх, и как только его мощность достигнет критического значения, процесс горения прекратится – факел оторвется. (Естественно, если нет внешних, посторонних источников зажигания, в виде раскаленных элементов конструкции, электрических искр, разрядов статического электричества и др.).

При пожарах в резервуарах факел пламени имеет иную форму. Он представляет собой обычно (особенно в безветренную погоду или при слабом ветре) конус в “нормальном” положении, с вершиной сверху и широким основанием внизу. Высота конуса может достигать полутора-двух диаметров основания. Периметр основания конуса пламени равен, как правило, периметру резервуара (или вскрытой его части) и

может составлять несколько десятков метров. Конвективные потоки воздуха вокруг периметра основания факела пламени менее интенсивны. А поток паров горючей жидкости обладает очень малой кинетической энергией. Он поднимается вверх по законам диффузии или за счет конвективных газовых потоков. Интенсивность (начальная скорость) этих потоков на несколько порядков ниже, чем скорость горючего в устье скважины. Поэтому при тушении резервуаров с ГЖ подавать огнетушащие средства необходимо в зону горения, от основания до вершины факела пламени, чтобы прекратить процесс горения одновременно во всем объеме факела пламени.

Обеспечить равномерную и одновременную подачу огнетушащих средств по периметру резервуара и во весь объем факела пламени при горении паров ЛВЖ, ГЖ на большой площади – задача очень сложная (и, как правило, неосуществимая). Поэтому, несмотря на то, что прекратить пламенное горение над поверхностью ЛВЖ, ГЖ нужно всего на 1–2 с (но одновременно во всем объеме факела пламени), тушение таких пожаров способом подачи огнетушащих средств непосредствен-

но в факел пламени по механизму отвода тепла от факела пламени, на практике почти не применяют. Да и другими механизмами объемного воздействия на факел пламени, например, с помощью порошковых составов или химически активных ингибиторов, почти не пользуются. Такие пожары, как правило, тушат либо путем охлаждения ЛВЖ, ГЖ, снижая тем самым интенсивность их испарения, что, в свою очередь, приводит к обеднению смеси в факеле пламени, снижению его интенсивности и температуры, и, таким образом, доводя процесс горения до полного прекращения. Либо путем изоляции горючей жидкости от зоны горения, подачей на поверхность ЛВЖ, ГЖ пены или порошка, которые также приводят к снижению интенсивности испарения ЛВЖ, ГЖ, обеднению смеси в факеле пламени, снижению его интенсивности и температуры и т.д. - до полного потухания.

Наконец, при тушении пожаров, связанных с горением твердых горючих материалов, охлаждение зоны горения (факела пламени) вообще имеет лишь второстепенное значение. Оно снижает лишь интенсивность лучистого и конвективного тепловых потоков к поверхности горючего материала и облегчает боевую обстановку в зоне горения на пожаре. Охлаждение зоны горения и даже полное прекращение пламенного горения над поверхностью ТГМ не означает, что пожар потушен.

Так как ТГМ, как правило, кроме гомогенного диффузионного пламенного горения, склонны к гетерогенному, беспламенному диффузионному горению и тлению (менее интенсивная форма гетерогенного диффузионного горения). Поэтому прекратить пламенное горение ТГМ, даже на достаточно продолжительное время - еще не означает потушить пожар. Он будет продолжаться по механизму беспламенного горения (которое может быть и весьма интенсивным).

В отличие от горючих газов, имеющих до воспламенения невысокую температуру, и от ЛВЖ, ГЖ - максимальные температуры которых при горении на пожарах не выше температуры их кипения, температура поверхности твердых горючих материалов, как правило, значительно выше не только температуры самовоспламенения продуктов их пиролиза, но даже выше температуры их вынужденного закипания. Она может достигать 800-900<sup>0</sup>С. И при этом в поверхностных слоях ТГМ продолжается процесс гетерогенного диффузионного горения. Поэтому после прекращения диффузионного пламенного горения продуктов пиролиза ТГМ над их поверхностью, если она не охлаждена до температуры ниже температуры самовос-

пламенения продуктов разложения ТГМ, вновь может возникнуть пламенное горение. Причем этот процесс может повторяться неоднократно, пока не будут достигнуты условия, необходимые (прекращение пламенного горения над поверхностью ТГМ) и достаточные (снижение температуры поверхности и поверхностных слоев ТГМ ниже температуры самовоспламенения продуктов их термического разложения). Еще строже было бы принять за условия достаточные для полного тушения пожара — снижение температуры ТГМ до температуры ниже температуры их самовозгорания. Но в динамических условиях тушения пожаров эта разница не так существенна. В квазистационарных условиях медленного самонагревания опасность возникновения пожара по механизму саморазогрева достаточно велика. На пожаре же она менее существенна. Поэтому за условия, достаточные для прекращения пожаров ТГМ с точки зрения физико-химических процессов горения, можно принять условия снижения температуры этих материалов ниже температуры начала их пиролитического разложения. При этом снизится выход летучих в зону горения и прекратится процесс пламенного горения. (Сначала зона горения обеднится горючим, снизится интенсивность процесса горения и тепловыделения, это приведет, в свою очередь, к снижению температуры пламени; снижение температуры пламени — приведет к снижению интенсивности теплового потока к поверхности горючего и дальнейшему снижению ее температуры и интенсивности выхода летучих и т.д. до полного потухания пламени). При тушении пространственных конструкций ТГМ в виде штабелей древесины и т.п. огнетушащим средством, действующим по механизму охлаждения, необходимо воздействовать им на все поверхности ТГМ, способные генерировать летучие продукты их пиролиза и служащие мощным постоянно действующим источником зажигания.

Таким образом, механизм прекращения горения того или иного пожара зависит от вида горючего вещества и его агрегатного состояния. А это, в свою очередь, определяет способ тушения пожара, вид огнетушащих средств и зону их подачи, способ подачи и оптимальную интенсивность. Так, например, при тушении пожаров газовых и газонефтяных фонтанов могут применяться все виды огнетушащих средств: нейтральные газы, химически активные ингибиторы, вода, порошковые составы, комбинированные средства тушения и т.д., кроме изолирующих средств типа пен. При тушении пожаров, связанных с горением ЛВЖ, ГЖ, могут применяться без исключения все виды



огнетушащих средств. Но возможность их практического применения и эффективность действия зависят от условий горения. При больших размерах факела пламени горючей жидкости, горящей в открытом пространстве (вне помещений), затруднительно применение огнетушащих средств, действующих по механизму объемного тушения: нейтральных газов, химически активных ингибиторов, порошковых огнетушащих средств объемного тушения (действующих преимущественно на факел пламени), и распыленной воды, действующей по механизму прекращения горения охлаждением факела пламени. Более эффективны изолирующие средства типа пен и порошков, действующих по поверхности горючей жидкости и охлаждающих средств, действующих по механизму прекращения горения охлаждением жидкой фазы горючего. Наоборот, при внутренних пожарах, связанных с горением ЛВЖ, ГЖ внутри зданий и помещений, эффективны такие средства объемного тушения, как нейтральные газы, химически активные ингибиторы, порошковые составы и др.

При тушении пожаров, связанных с горением твердых горючих материалов наиболее эффективны охлаждающие огнетушащие средства: вода, водные растворы загустителей и смачивателей, действующие по механизму прекращения горения охлаждением горючих материалов (прекращением выхода летучих в зону горения) и изолирующие огнетушащие средства типа пен и порошков, приводящие к тому же эффекту.

Наоборот, мало эффективны при тушении пожаров ТГМ, способных к гетерогенному диффузионному горению, такие огнетушащие средства, как нейтральные разбавители, химически активные ингибиторы, порошковые огнетушащие средства, воздействующие преимущественно на факел пламени. Эти общие рекомендации по физико-химии механизмов прекращения процессов диффузионного горения в условиях пожаров следует учитывать и при проектировании автоматических систем пожаротушения и при проектировании пожарной техники и при разработке методов тушения пожаров силами и средствами пожарной охраны.

## ОГNETУШАЩИЕ СРЕДСТВА И МЕХАНИЗМЫ ПРЕКРАЩЕНИЯ ГОРЕНИЯ ИМИ

## § 8.1. Понятие огнетушащие средства и их классификация

Из обширного понятия огнетушащих средств пожаротушения в круг вопросов дисциплины входят только огнетушащие составы, механизм их действия на процессы горения, их физико-химические свойства и качества, которые необходимо знать для применения их с максимальной эффективностью. Поэтому под огнетушащими средствами (ОС) будем понимать различные вещества и материалы, с помощью которых можно непосредственно создавать условия прекращения горения.

Все огнетушащие средства классифицируются по двум признакам: по агрегатному состоянию; по механизму прекращения горения. По агрегатному состоянию ОС подразделяются на жидкие (вода и водные растворы и др.), пенные ОС (ВМ и химическая пены), порошковые составы (ПС), сыпучие материалы (песок, земля, флюсы, специальные составы и др.).

По механизму прекращения горения огнетушащие средства подразделяются на четыре группы: охлаждающие зону реакции или горящие вещества; разбавляющие реагирующие вещества в зоне реакции горения; химически тормозящие реакцию горения; изолирующие реагирующие вещества от зоны горения.

Охлаждение зоны реакции (снижение температуры в зоне реакции) происходит всегда, во всех случаях, т.е. при любом механизме прекращения горения. А охлаждение горючих веществ целесообразно только в тех случаях, когда снижение их температуры до определенного уровня может привести к прекращению процесса горения. Это зависит от агрегатного состояния горючего материала.

Охлаждение газообразных горящих веществ лишено практического смысла, так как горючие газы горят при любой начальной температуре, а охлаждение ЛВЖ, ГЖ и твердых горючих материалов при их диффузионном (гомогенном) горении наиболее целесообразно. Но оно не имеет прямой связи с охлаждением зоны реакции, а влияет на неё лишь косвенно, через другие параметры процесса горения. Оно ведет к снижению интенсивности или полному прекращению выхода горючих паров ЛВЖ, ГЖ или продуктов пиролиза, при горении ТТМ, в зону реакции, т.е.

к обеднению зоны реакции газообразным горючим компонентом, к разбавлению зоны реакции окислителем (окружающим воздухом), продуктами горения, а далее - к снижению интенсивности реакций горения и интенсивности тепловыделения. Это, в свою очередь, вызывает снижение температуры в зоне реакции, т.е. приводит к охлаждению зоны реакции. Охлаждение горючих материалов совпадает с понятием тушения охлаждением зоны химических реакций горения лишь в частном случае гетерогенного горения твердых горючих веществ и материалов. Например, компактную струю воды надо подавать не в пламя (там она практически бесполезна), а на поверхность горючего материала.

Охлаждение факела пламени и горящего материала будет тем полнее, чем больше поверхность и время контакта охлаждающего вещества с газовой средой или с горючим материалом.

Поэтому при возможности воду надо подавать в факел пламени или на горящую поверхность равномерно, т.е. более распыленной и непрерывно. Например, при тушении мощного газового или газонефтяного фонтана распыленные струи эффективнее, чем компактные. Но при этом необходимо учитывать следующее.

1. Ручными приемами подать тонкораспыленную воду в факел пламени практически невозможно без специальных средств защиты ствольщиков от теплового излучения. Для этого применяют специальные технические устройства типа АГВТ или самоходной установки, обеспечивающей дистанционную подачу воды прямо к устью скважины.

2. При подаче воды в зону горения степень дисперсности распыла капель и начальная скорость их полета должны быть максимальны, с тем чтобы они могли достигнуть факела пламени. В противном случае мощные конвективные потоки восходящего воздуха и горячие продукты горения (при подаче воды сверху) приведут к тому, что тонкораспыленная вода будет уноситься или испаряться, не достигая зоны горения.

При выборе механизма прекращения горения важную роль играет исходное состояние горючего материала, вид и режим горения на пожаре. В зависимости от вида и режима горения, агрегатного состояния горючего вещества и других факторов механизм прекращения горения, реализуемый одним и тем же видом огнетушащего средства, может быть различен. Например, при тушении факела пламени газового фонтана и пожаров твердых горючих материалов с использованием порошковых огнетушащих средств. И, наоборот, один и тот же механизм прекращения горения может осуществляться различными видами огнету-

шащих средств. Например, механизм прекращения горения изоляций с применением пенных и порошковых огнетушащих средств при тушения пожаров, связанных с горением ЛВЖ, ГЖ с открытой поверхности или компактных твердых горючих материалов. Поэтому априорно и однозначно относить то или иное огнетушащее средство к определенной группе по механизму прекращения горения без учета конкретных условий применения ОС нельзя. В зависимости от условий их применения, основной механизм прекращения горения данным ОС может изменяться. И, наоборот, у различных огнетушащих средств механизм прекращения горения может быть одинаковым. Почти все огнетушащие средства, попадая в зону горения, действуют комплексно, одновременно по двум-трем и более механизмам прекращения горения. Они охлаждают горючий материал, кроме того, охлаждают зону реакции, разбавляют реагирующие компоненты в ней и т.д. Но для каждого огнетушащего средства существуют один-два основных механизма прекращения горения, которые являются доминирующими по сравнению с остальными, второстепенными, сопутствующими, побочными. Поэтому особенно важно наиболее четко выделить основной - доминирующий механизм. А уже по этому механизму прекращения горения относить то или иное огнетушащее средство к какой-либо группе, но при определенных условиях его применения.

Наиболее широко применяются огнетушащие средства, охлаждающие поверхность горящих веществ и материалов, и огнетушащие средства, изолирующие эти вещества и материалы от зоны горения. И то, и другое достигается методом подачи этих огнетушащих средств на поверхность горючего. В качестве огнетушащих средств в этом случае применяются жидкие, коллоидные, дисперсные системы и сыпучие твердые материалы. А в качестве объектов тушения выступают при этом преимущественно жидкие и твердые горючие материалы. Однако совокупный механизм прекращения горения более сложен. Наиболее простыми по механизму прекращения горения считаются нейтральные разбавители, применяемые преимущественно для тушения пламенного горения газов и паров горючих жидкостей. А наиболее однозначными по механизму прекращения горения считаются химически активные ингибиторы.

## § 8.2. Механизм прекращения горения пламени нейтральными газами

Рассмотрим механизм снижения скорости реакции горения не изменением соотношения компонентов горючей смеси  $c_A$  и  $c_B$  в зоне реакции, а введением разбавляющих эти реагенты нейтральных (инертных) газов (НГ). В качестве таких разбавителей чаще всего применяют азот, углекислый газ, водяной пар, реже гелий, аргон и некоторые др. Попадая в зону реакции, эти газы снижают концентрацию молекул горячего и окислителя в единице объема, и соответственно количество эффективных соударений их молекул. Это приводит к снижению скорости реакции, скорости тепловыделения, температуры, доводя ее в зоне реакции до  $T_{II}$ . Известно, что диффузионное горение прекращается при концентрации кислорода приблизительно около 14%. Но, если бы механизм прекращения горения всех нейтральных газов сводился к простому разбавлению, то количество НГ, необходимое для тушения диффузионного пламени, было бы одним и тем же, независимо от вида НГ. Из физики горения и из практики пожаротушения известно, что огнетушащие концентрации НГ зависят не только от вида разбавителя, но и от вида горючего и от условия их подачи и от многих других факторов. Рассмотрим их более подробно. Кроме рассмотренного выше механизма прекращения горения путем простого разбавления, нейтральные газы по-разному воздействуют на зону реакции горения в зависимости от их физических свойств. Поступая в зону реакции с температурой окружающей среды  $20-30^{\circ}\text{C}$ , они прогреваются до температуры приблизительно  $1000^{\circ}\text{C}$ , отнимая некоторое количество тепла. Количество отводимого тепла можно определить по формуле

$$Q_{\text{н.г}} = V_{\text{н.г}} \rho_{\text{н.г}} c_{\text{р.н.г}} \Delta t_{\text{н.г}}, \quad (8.1)$$

где  $V_{\text{н.г}}$  - объем подаваемого в зону горения нейтрального газа;

$\rho_{\text{н.г}}$  - плотность нейтрального газа;

$c_{\text{р.н.г}}$  - удельная теплоемкость нейтрального газа;

$\Delta t_{\text{н.г}}$  - разность температур нейтрального газа и зоны горения.

Поэтому чем выше теплоемкость вводимых в зону реакции нейтральных газов, тем эффективнее их огнетушащее действие.

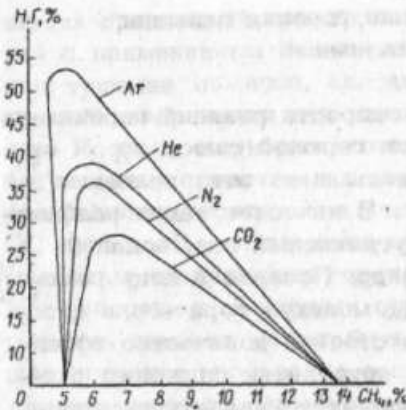


Рис. 8.1. Зависимость огне-тушащей концентрации него-рючего газа от концентрации горючего в смеси

рашения горения нейтральных газов более сложный. Он зави-сит не от  $\alpha$  как фактора разбавления, не от  $\lambda_{НГ}$  или  $c_p$  смеси, а зависит и от степени разбавления, и от комплексного параметра  $c_p/\lambda$  (рис. 8.1).

Причем повышение теплопроводности смеси газов после вве-дения разбавителя не повышает эффективности НГ, а снижает ее. Это объясняется тем, что при введении НГ, более существен-на интенсификация теплоотвода в свежую горючую смесь, где  $T_{см} < T_{з.р}$  (незначительное повышение теплоотвода в продук-ты горения, так как  $T_{з.р} = T_{пр.с}$  оказывается несущественным).

Количество тепла  $q$ , отводимого от зоны реакции, пропор-ционально коэффициенту  $\lambda$  и градиенту температур  $\frac{dT}{dx}$  ;  
 $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$  ; а градиент температур в сторону горючей смеси в десятки и даже в сотни раз выше, чем в сторону продуктов горения.

Интенсификация теплопередачи в свежую горючую смесь, посту-пающую в зону горения, ускоряет процесс горения. Поэтому коэффициент  $\lambda$  стоит в знаменателе дроби, определяющей огне-гасящую эффективность нейтральных газов. Произведем коли-чественный анализ эффективности нейтральных газов, начиная с простейшего - азота, которого в воздухе и без того около 80%. Его огне-тушащая концентрация равна примерно 35-40%, при этом концентрация кислорода снижается до 14-15%, при ко-

Некоторые нейтральные газы, помимо снижения интенсивности тепловыделения и повышения теплоотвода из зоны реакции, увеличивают интенсивность теплоотвода за счет резкого повы-шения коэффициента теплопере-дачи газовой смеси  $\lambda_{см}'' \gg \lambda_{см}'$ . По такому механизму прекраще-ния горения действует, напри-мер, гелий ( $\lambda_{He} = 6 \lambda_{N_2}$ ). А так как при этом интенсифици-руется и теплоотвод к свежей горючей смеси при кинетичес-ком режиме горения, то от вве-дения таких НГ скорость рас-пространения пламени должна повышаться. Но механизм прек-

торой происходит прекращения диффузионного горения (из-за низкой концентрации кислорода в смеси). Примерно такова же (чуть ниже) огнетушашая эффективность гелия. Но теплопроводность гелия в 6 раз выше теплопроводности азота. Зато и теплоемкость гелия в 5 раз выше теплоемкости азота.  $\lambda_{\text{He}} \approx 6\lambda_{\text{N}_2}$ .

а  $c_{p\text{He}} = 5c_{p\text{N}_2}$ . Поэтому  $\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{He}} \approx \left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{N}_2}$  и, соответственно,  $\alpha_{\text{He}} \approx 2\alpha_{\text{N}_2}$ .

Анализ этих параметров для аргона и двуокиси углерода показывает, что теплопроводность этих разбавителей примерно одинакова:

$$\lambda_{\text{CO}_2} = 13,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \text{ а } \lambda_{\text{Ar}} = 16,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

А теплоемкости их различаются почти в 2 раза:

$$c_{p\text{CO}_2} = 0,91 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}, \text{ а } c_{p\text{Ar}} = 0,53 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Соответственно, комплекс  $c_p/\lambda$  для двуокиси углерода будет равен:

$$\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{CO}_2} = \frac{0,91}{13,6} \approx 6,7 \cdot 10^{-2}, \text{ а для аргона}$$

$$\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{Ar}} \approx \frac{0,53}{16,6} \approx 3,2 \cdot 10^{-2}. \text{ Отношение этих}$$

комплексов будет равно

$$\frac{\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{CO}_2}}{\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)_{\text{Ar}}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-2}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \approx 2,1;$$

значит, огнетушашая эффективность  $\text{CO}_2$  должна быть примерно в 2 раза выше огнетушашей эффективности аргона.

Экспериментальные исследования по определению огнетушащих концентраций при горении метано-воздушных смесей (от 5 до 15% метана в воздухе) показали (см. рис. 8.1), что для полного прекращения реакций горения аргона нужно довести до  $\sim 53\%$  по объему, а двуокиси углерода  $\sim 27\%$  по объему, т.е.  $\alpha_{\text{Ar}} \approx 2\alpha_{\text{CO}_2}$ , точнее,  $53/27 \approx 1,97$ . Огнетушашая концентрация аргона почти в 2 раза выше, чем  $\text{CO}_2$ ; т.е. обратно

пропорциональна отношению комплексов  $\left(\frac{c_p}{\lambda}\right)$ . Отсюда следует что огнетушащие составы действуют и по механизму прекращения горения разбавлением и снижением скорости тепловыделения, и по механизму прекращения горения теплоотводом на на-

гревание вводимых НГ, и по механизму интенсификации теплоотвода из зоны реакции и т.д.

Огнетушащие концентрации одних и тех же нейтральных газов (приводящие к полному прекращению процесса горения) неодинаковы для различных горючих веществ и материалов. Так, например, для тушения пламени бензина концентрация углекислого газа составляет 19-20%, а для тушения древесины 25%.

Механизм прекращения горения водяного пара таков же, как и рассмотренные выше, а огнетушащая концентрация его близка к концентрации азота и равна 30-35% по объему.

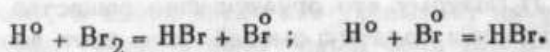
### § 8.3. Механизм прекращения горения пламени химическими активными ингибиторами

Наиболее "чистым" или "прямым" однофакторным способом прекращения процессов горения обычно считается механизм тушения пламени химически активными ингибиторами (ХАИ). Механизм прекращения горения химически активными ингибиторами является наиболее сложным и на сегодня еще недостаточно полно изучен. Он заключается в снижении скорости химической реакции ими или в химическом торможении скорости реакции (снижение скорости тепловыделения в зоне реакции, расширение зоны реакции и т.д.). Сам механизм химического торможения скорости реакций в зоне горения может быть представлен следующим образом. Из физики горения известно, что при протекании химических реакций в процессе превращения исходных компонентов горючей смеси в конечные продукты горения образуется и много промежуточных продуктов (сначала образуются промежуточные продукты разложения горючего, затем продукты неполного окисления, потом в процессе дальнейших взаимодействий этих промежуточных продуктов между собой и с исходными компонентами смеси или окислителем образуются конечные продукты реакции). Причем продолжение каждой последующей стадии химических реакций возможно при взаимодействии не любых промежуточных продуктов реакции, а лишь определенных химически активных комплексов (энергетически и химически возбужденных атомов и радикалов  $H^{\circ}$ ,  $CH^{\circ}$ ,  $OH^{\circ}$ ,  $CH_2^{\circ}$  и др.). Эти химически активные комплексы в химической кинетике называются активными центрами реакции. Вступая во взаимодействие с другими промежуточными продуктами химических реакций, они продолжают последовательную цепь реакции, а если образуются новые активные центры, то происходит разветвление химических цепей, т.е. идет разветвленная (наиболее быст-



рая) цепная химическая реакция. Если в зону протекания химических реакций ввести дополнительные вещества, приводящие к нейтрализации активных центров, то будет происходить обрыв цепей. Причем чем интенсивнее нейтрализация активных центров реакции, тем эффективнее тормозящее воздействие химически активных ингибиторов на скорость промежуточных химических реакций, составляющих цепь последовательных реакций в процессе горения.

Наиболее эффективно тормозящими промежуточные химические реакции горения являются галоидсодержащие или галоидированные углеводороды. Гибель активных центров химических реакций горения происходит тогда, когда они вступают во взаимодействие с атомами и радикалами, содержащими галоид, и образуют насыщенные малоактивные химические соединения:



Выведенные из зоны реакции активные атомы водорода вместо конечного продукта полного окисления  $H_2O$  дают насыщенное соединение  $HBr$ , которое, в свою очередь, является активным ингибирующим комплексом. Таким образом, выведены из зоны реакции два активных атома водорода, т.е. оборваны две цепочки реакций и возникли еще две молекулы ингибитора  $HBr$ . Это ведет к замедлению скорости реакции. В формуле (8.2) резко снижается константа скорости реакции  $K$  (на несколько порядков) и увеличивается энергия активации  $E$ :

$$w = K c_A^n c_B^m e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (8.2)$$

Концентрации компонентов  $c_A$  и  $c_B$  практически не изменяются. Теплофизические параметры смеси, такие как теплоемкость, теплопроводность газовой смеси в зоне реакции, также изменяются относительно слабо (например, по сравнению с их изменением при введении в горючую смесь нейтральных разбавителей). Это объясняется тем, что количество химически активных ингибиторов, которое надо ввести в зону реакции для прекращения процессов горения, ничтожно мало и составляет 2-3%. Это почти в 10 раз меньше, чем требуется для тушения пламени наиболее эффективного из нейтральных газов  $CO_2$  (25-30%), и примерно в 20-25 раз меньше, чем количество

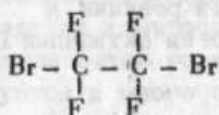
такого малоэффективного инертного разбавителя, как аргон, которого требуется около 50% для полного прекращения реакций горения.

К химически активным ингибиторам относятся такие галоидированные углеводородные соединения, как четыреххлористый углерод  $CCl_4$ , бромэтил  $C_2H_5Br$ , бромистый метилен  $CH_2Br_2$ , тетрафтордибромэтан  $C_2F_4Br_2$  и некоторые др.

Расщепляясь в зоне реакции на свободные галоидрадикалы и углеродный или углеводородный остаток, эти химически активные ингибиторы вступают во взаимодействие с промежуточными продуктами реакции горения, приводя к обрыву цепных реакций горения.

Например,  $C_2H_5Br$ , разлагаясь, дает атом брома и углеводородный остаток  $C_2H_5$ , который, разлагаясь, окисляется в зоне реакции до  $CO_2$  и  $H_2O$ . Поэтому это огнетушащее вещество более эффективно при тушении богатых смесей (оно дает дополнительный горючий остаток, отнимающий кислород из зоны реакции, который в богатых смесях и так находится в дефиците). Он имеет и недостаток, при тушении бедных смесей и при концентрациях ингибитора 6-11% бромэтил сам является горючим веществом.

Наиболее широкое применение в системах пожаротушения нашел фреон 114В2. Его структурная формула:



При распаде молекулы в зоне высоких температур отщепляются два атома брома и дают два активно ингибирующих атома галоида, а соединение  $C_2F_4$  - достаточно насыщено и действует в зоне реакции просто как "инертная масса". Возможны и другие схемы реакции. Все другие механизмы действия ХАИ менее существенны и в первом приближении могут быть не приняты во внимание. Хотя изменение теплофизических свойств горючей смеси при введении "тяжелых молекул" химически активных ингибиторов также весьма существенно и вполне соизмеримо по огнетушащему эффекту с их "тормозящим" влиянием. Действительно, даже 2-3% такого теплоемкого компонента, как тетрафтордибромэтан, молекулярная масса которого равна 260, теплоемкость паров  $c_p = 0,38$  кДж/моль, а энергия рас-

пада молекулы, начинающегося при  $450-500^{\circ}\text{C}$ , составляет  $E_{\text{рас}} \sim 273$  кДж/моль, могут существенно изменить теплофизические параметры горючей смеси.

Область применения нейтральных газов и химически активных ингибиторов. Галоидуглеводороды, применяемые для тушения пожаров, являются главным образом бромфторхлорпроизводными метана и этана. Они имеют промышленное название фреоны, хладоны и торговое - галлоны. Существует несколько систем их условного обозначения. По одной из них единицы (последняя цифра) означают число атомов фтора в молекуле, десятки (предшествующая ей цифра) - число атомов водорода, увеличенное на единицу, сотни (третья от конца цифра) - число атомов углерода, уменьшенное на единицу. Для обозначения бромфреонов после номера фреона ставится буква "В" (обозначающая бром), а цифра после нее указывает на число атомов брома в фреоне. Число атомов хлора, если они имеются в молекуле фреона, по этой системе не указываются, а рассчитываются как недостающие по формуле  $\text{C}_n(\text{HClF})_{2n+2}$ .

Например, трифторхлорбромэтан  $\text{C}_2\text{HF}_3\text{BrCl}$  обозначается как фреон 123В1, где цифра 3 равна числу атомов фтора, 2 - числу атомов водорода плюс 1, 1 - числу атомов углерода минус 1, В1 - означает содержание атомов брома. Так как сумма атомов водорода, хлора, фтора и брома должна быть равна 6, то в молекуле фреона 123В1, должен содержаться один атом хлора.

В соответствии с указанной выше системой дибромтетрафторэтан ( $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ ) будет маркироваться как фреон 114В2, бромтрифторметан ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ) - как фреон 13В1, а  $\text{CF}_2\text{BrCl}$  - фреон 12В1. В табл. 8.1 приведены лабораторные огнетушащие концентрации некоторых фреонов, применяемых в целях пожаротушения.

На огнетушащие концентрации большое влияние оказывают условия процесса горения - его энергетика. Так, в экспериментах по определению огнетушащих концентраций галона 1301 для различных веществ процесс горения условно был разделен по энергетике пожара на три категории. "Малоэнергетичные" пожары - всю энергию для испарения жидкость получает от пламени, тушение достигается при небольших концентрациях галона; "среднеэнергетичные" - кроме пламени, тепло для испарения выделяют нагретые поверхности; "высокоэнергетичные" - имеются дополнительные источники тепла для испарения жидкости, а также источники зажигания.

Таблица 8.1

Галлон	1211	1301	1202	2402	1011	1001	113	114	122	251	131
Торговое наименование	<i>BCF</i>	<i>BTM</i>	<i>DDM</i>	<i>DTE</i>	<i>CB</i>	<i>MB</i>					
Формула	$\text{CF}_2\text{BrCl}$	$\text{CF}_3\text{Br}$	$\text{CF}_2\text{Br}_2$	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	$\text{CH}_2\text{BrCl}$	$\text{CH}_3\text{Br}$	$\text{CCl}_3\text{F}$	$\text{CF}_4$	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	$\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$	$\text{CClF}_3$
Температура кипения, °С	-4,0	-57,6	24,4	47,5	67,8	4,5	23,8	-128	-29,8	-38	-81,4
Горючее	Огнетушащие концентрации, % об.										
н-гептан	3,8	3,5	2,4	2,1	4,5	5,1	7,0	16,7	8,3	7,4	7,7
Ацетон	3,8	3,5	2,2	2,3	4,4	4,6	7,3	14,8	8,5	-	7,3
Бензол	2,9	2,9	3,2	1,9	4,0	4,4	-	16,2	-	-	5,8
Диэтиловый эфир	4,4	3,9	2,5	2,2	4,9	5,2	8,3	17,5	10,3	-	-
Этанол	4,5	3,9	2,6	2,4	5,1	5,3	-	17,7	-	-	9,1
н-гексан	3,7	3,3	2,3	2,1	-	-	-	16,0	-	-	7,8
Метанол	8,2	7,3	4,2	4,4	-	7,8	16,0	21,9	15,9	11,6	12,4

Огнетушащие объемные концентрации галона 1301 в зависимости от типа пожара приведены в табл. 8.2

Таблица 8.2

Горючее	Малознергетич- ные пожары, % об.	Среднеэнерге- тичные пожары, % об.	Высокоэнерге- тичные пожары, % об.
Ацетон	3,5	4,3	4,5
Бензол	2,8	4,5	4,6
Гексан	3,4	4,3	6,9
Метанол	7,4	9,0	14,0
Пропан	-	3,7	6,2
Ацетилен	-	9,3	19,2

Из механизмов огнетушащего действия НГ и ХАИ следует, что наиболее эффективно их воздействие на саму зону химических реакций горения. Поэтому применять их следует преимущественно для прекращения пламенного горения. Поскольку действуют НГ и ХАИ в газообразном состоянии, а газы стремятся равномерно распределиться по всему окружающему пространству, то эти огнетушащие составы применяют преимущественно для тушения пожаров в замкнутых объемах: в зданиях, помещениях, сооружениях и т.п. Поэтому они применяются в основном в стационарных установках для тушения внутренних пожаров. Химически активными ингибиторами заполняют весь объем помещения, где произошел пожар, доводя концентрацию НГ до равной или выше огнетушащей. При этом необходимо учитывать утечки газа через неплотности с отходящими продуктами горения и т.д., а также неравномерность распределения НГ по защищаемому объему и другие факторы. Иногда НГ и особенно перегретый водяной пар применяют и для тушения пламен открытых пожаров на ректификационных колоннах, технологических установках и других промышленных объектах, где имеются запасы НГ или перегретого пара.

Некоторые из галогенированных углеводородов обладают высокой токсичностью (особенно продукты термического распада их), и поэтому их не применяют для тушения пожаров.

Зарубежными специалистами предложен параметр, характеризующий токсичность ХАИ, представляющий собой отношение огнетушащей концентрации (ОГК) к опасной концентрации (ОК). В табл. 8.3 приведены сравнения некоторых ХАИ по их огнетушащей эффективности и токсичности.

Агент	Опасная концентрация		Огнетушащая концентрация		$R = \frac{ОГК}{ОК}$
	% об.	кгм <sup>3</sup>	% об.	кгм <sup>3</sup>	
Г 104	1,2	0,082	9,7	0,662	8,1
Г 1001	0,6	0,026	7,1	0,304	11,8
Г 1011	2,6	0,147	6,35	0,352	2,4
Г 1211	24,0	1,762	5,2	0,384	0,22
Г 1301	50	2,403	4,9	0,326	0,098
Г 2402	8,5	0,992	3,5	0,406	0,41
CO <sub>2</sub>	50	0,625	42	0,525	0,84

Не применяют для целей пожаротушения ХАИ, у которых  $R$  больше 4, а также не следует использовать ХАИ с  $R$  больше 1 для помещений, где возможно присутствие людей.

Из табл. 8.3 видно, что наименее опасным является галон 1301. Галон 1301 в последние годы находит все более широкое применение за рубежом в системах пожаротушения судов и других помещений, где возможно пребывание людей.

Химически активные ингибиторы также применяются в ручных огнетушителях, устанавливаемых на различных видах транспорта: автомобилях, поездах, самолетах и судах.

Галоидуглеводороды в отсутствие воды не взаимодействуют с большинством металлов, однако при наличии влаги они вызывают сильную коррозию.

#### § 8.4. Пены как огнетушащие средства

Пена представляет собой дисперсную двухфазную систему, состоящую из ячеек, заполненных газом или паром и разделенных пленками жидкости. Газ или пар, заполняющий ячейки, является дисперсной фазой, а жидкость — дисперсионной средой. По способу получения пены бывают химические и воздушно-механические.

Независимо от способа получения пены обладают рядом свойств. К ним относятся.

Структура пены. Структура пены определяется отношением объемов газовой и жидкой фаз в единице объема пены и характеризует механические и реологические ее свойства. Если объем газовой фазы превышает объем жидкости не более чем в

10-20 раз, ячейки пены, заполненные газом, имеют сферическую форму. В таких пенах газовые пузырьки окружены оболочками жидкости относительно большой толщины. С увеличением отношения  $\frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ж}}}$  толщина пленки жидкости, разделяющая газовые объёмы, уменьшается, а газовая полость утрачивает сферическую форму и трансформируется в многогранник. Пены, у которых отношение  $\frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ж}}}$  составляет несколько десятков или даже сотен, имеют полиэдрическую (многогранную) форму, причём форма многогранников может быть различной - параллелепипеды, треугольные призмы, тетраэдры и т.д. Со временем происходит утончение жидких оболочек и, как следствие, изменение структуры пены - старение. В процессе старения шарообразная форма ячеек переходит в многогранную.

Кратность пены. Кратность пены  $K_{\text{п}}$  - это отношение объёма пены  $V_{\text{п}}$  к объёму жидкости  $V_{\text{ж}}$ , из которой она получена:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{V_{\Gamma} + V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}}, \quad (8.3)$$

где  $V_{\Gamma}$  - объём газа.

Различают пены низкой кратности -  $K_{\text{п}} \leq 20$ , средней кратности -  $20 < K_{\text{п}} \leq 200$  и высокой кратности -  $K_{\text{п}} > 200$ .

Отношение объёма газа в пене  $V_{\Gamma}$  к объёму пены  $V_{\text{п}}$  называется газосодержанием пены  $\beta$ :

$$\beta = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{п}}}.$$

Газосодержание и кратность связаны между собой соотношением

$$\beta = \frac{K_{\text{п}} - 1}{K_{\text{п}}} = 1 - \frac{1}{K_{\text{п}}}. \quad (8.4)$$

Дисперсность пены. Дисперсность пены  $D_{\text{п}}$  оценивается либо средним размером пузырька, либо распределением пузырьков пены по размерам. Чаще всего под дисперсностью понимают величину, обратную среднему размеру пузырьков пены, т.е.

$$D_{\text{II}} = \frac{1}{d_{\text{CP}}}, \quad d_{\text{CP}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} d_i N_i}{\sum N_i},$$

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

Чем меньше средний диаметр пузырька пены, тем больше ее дисперсность.

Дисперсность пены характеризуется удельной поверхностью раздела фаз. Если пузырьки имеют одинаковые размеры, пена называется монодисперсной и соответственно если имеется  $i$  фракций или размеров пузырьков - полидисперсной. Согласно определению, пены могут быть высокодисперсными или низкодисперсными.

На дисперсность пены существенное влияние оказывают физико-химические свойства пенообразующего раствора (поверхностное натяжение, вязкость и т.д.), способ смешения фаз, конструкция генератора пены.

Изучение влияния кратности пены на средний диаметр пузырьков показало, что с увеличением кратности пены растет и средний диаметр пузырьков. Так как при увеличении кратности пены толщина пленок между пузырьками уменьшается, соответственно растет средний диаметр пузырьков.

Дисперсный состав пены изменяется во времени в процессе старения. Наиболее интенсивные изменения в дисперсном составе пены протекают в начальный момент после ее образования. Это происходит за счет изменения поверхности раздела фаз в пене в результате разрушения пленок между ячейками и их объединения. Отмечено, что с течением времени полидисперсность пены увеличивается.

Вязкость пены. Вязкость характеризует реологические свойства пены, т.е. ее способность к растеканию, и оценивается либо коэффициентом динамической вязкости -  $\mu$ , либо напряжением сдвига -  $\sigma$ .

В отличие от жидкости пена обладает свойствами "твердого тела". Внешне это проявляется в способности пены сохранять определенное время свою первоначальную форму.

Вязкость пены зависит от многих факторов и параметров, прежде всего от природы пенообразователя, кратности, дисперс-



ности. Зависимость коэффициента динамической вязкости  $\mu$  пены от ее кратности при различных диаметрах пузырьков показана на рис. 8.2. Из рисунка видно, что коэффициент динамической вязкости пены повышается с увеличением ее кратности и дисперсности,

Со временем в процессе старения пены вязкость ее сначала увеличивается, а затем в зависимости от типа пенообразователя может оставаться постоянной или уменьшаться. Высокой вязкостью обладают пены, имеющие меньшую скорость истечения жидкости.

Плотность пены зависит от соотношения жидкой и газовой фаз и может колебаться от  $0,5\rho_1$  ( $\rho_1$  - плотность жидкой фазы) до значений, близких к  $\rho_{\text{газа}}$ . Пены, применяемые для тушения пожаров, имеют плотность  $10-5 \text{ кг/м}^3$  и меньше. Плотность пены является величиной переменной во времени и зависит от степени разрушения пены.

**Теплопроводность пены.** Передача тепла в пене происходит через пузырьки газа и через жидкие пленки между этими пузырьками. Из-за наличия газовой фазы теплопроводность пены довольно мала.

**Электропроводность пен.** Электропроводность пен пропорциональна количеству содержащейся в ней жидкости. Экспериментально установлено, что отношение электропроводности жидкости и электропроводности пены линейно связано с отношением их плотностей. Уравнение, описывающее эту зависимость, имеет вид:

$$\frac{x_0}{x_{\text{п}}} = \frac{3}{2} K_{\text{п}},$$

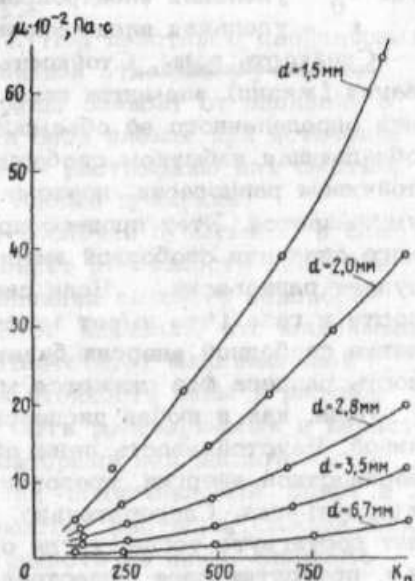


Рис. 8.2. Зависимость коэффициента динамической вязкости пены от ее кратности при различных диаметрах пузырьков

где  $x_0$  - удельная электропроводность раствора;

$x_{II}$  - удельная электропроводность пены.

Стойкость пены. Стойкость пены - это время существования (жизни) элемента пены (отдельного пузырька, пленки) или определенного её объема. Известно, что 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.

По времени "жизни" пены разделяются на короткоживущие (флотационные), долгоживущие (моющие, пожарные), безграничноживущие (отвержденные пены - вулканизованные, застеклованные).

Разрушение пены в нормальных условиях происходит в результате истечения жидкости и разрыва пленок внутри пены. Преобладание того или другого из этих процессов при разрушении пены зависит от многих факторов. В стойких пенах пленки не разрушаются в течение 10-20 мин. В пенах высокой кратности ("сухих") процесс истечения затруднен и разрушение обусловлено в основном разрывом пленок.

У пены средней кратности, т.е. пены с относительно толстыми прослойками между пузырьками оба механизма разрушения осуществляются последовательно: процесс начинается с истечения жидкости, заключенной между пузырьками (синерезис). Это приводит к быстрому утончению пленок, и, как следствие, к разрыву.

Истечение жидкости из пены представляет собой чисто гидродинамическое явление. Из всего объема пены раствор, содержащийся в прослойках, стекает вниз, подпитывая нижележащие слои пены. Истечение заканчивается, когда вся излишняя жидкость будет удалена. На этой стадии существенным стано-

влияние капиллярных явлений. Под действием капиллярных сил, обусловленных различной кривизной отдельных участков пленки пузырька, что, в свою очередь, зависит от давления в соседних пузырьках, поверхностные слои пленок при истечении подвергаются упругим деформациям - растяжению или сжатию, что также приводит к разрушению пленки пузырька.

Скорость истечения жидкости из оболочки пузырьков, а следовательно, и стойкость пены зависят от вязкости пенообразующего раствора. Исследование влияния вязкости пенообразующего раствора на стойкость пены показали, что максимальная стойкость пены не всегда соответствует максимальной вязкости раствора. Для повышения стойкости пены в раствор вводят стабилизаторы. Они могут быть растворимыми и нерастворимыми. Эффективными стабилизаторами пен являются карбоксиметицеллюлоза, полиакриламид поливиниловый спирт и др. Эти вещества, увеличивая вязкость, раствора, способствуют замедлению процесса истечения жидкости из пены. Скорость

разрушения пены определяется отношением  $\frac{\Delta V_{\text{разр}}}{V_{\text{п}}}$ , а степе-

нь разрушения -  $\frac{\Delta V_{\text{разр}}}{V_{\text{п}}}$ ,

где  $\Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}}$  - объем пены, разрушившейся за промежуток времени,  $V_{\text{п}}$  - начальный объем пены.

Интенсивность разрушения пены определим по формуле

$$I_{\text{разр}} = \frac{\Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}}}{V_{\text{п}}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (8.5)$$

Чаще пользуются понятием стойкость пены или устойчивость. Стойкость пены  $S_{\text{п}}$  - это величина, обратная интенсивности разрушения:

$$S_{\text{п}} = \frac{1}{I_{\text{разр}}}$$

Интенсивность разрушения пены характеризуется скоростью уменьшения ее объема ( $\frac{\Delta V_{\text{п}}^{\text{р}}}{\Delta t}$ ). Косвенным показателем этого процесса может служить скорость выделения из пены жидкой фазы (отсека). Под стойкостью пены понимается время, в течение которого из пены выделяется 50% объема жидкости, из которой она получена. Эта величина является услов-

ной, так как при тушении пожара пена разрушается не только за счет тех факторов, которые рассматривались ранее (синергиз жидкой фазы и разрушение стенок пузырьков в результате их утончения или под действием капиллярных сил), но также и под действием таких факторов, как мятые пены (силы трения при движении); термическое воздействие окружающей среды (контакт с горячей жидкостью или поверхностью, лучистый тепловой поток от пламени) и конвективные токи.

В последнее время стали пользоваться понятием огнестойкости пены. Этот параметр в большей степени отвечает реальным условиям. Он определяется следующим образом. В противень наливается горячая жидкость. Затем на поверхность ГЖ подается слой пены определенной толщины таким образом, чтобы в углу противня остался небольшой участок открытой поверхности горячей жидкости. На этом участке жидкость поджигают и фиксируют время, в течение которого пламя распространится на всю поверхность жидкости.

Экспериментально установлено, что стойкость пены зависит в основном от температуры окружающей среды, дисперсности и толщины стенки пузырьков, т.е.

$$S = f\left(\frac{1}{t_{\text{окр}}}; D_{\text{п}}; \delta_{\text{ст}}\right).$$

Толщина стенок пузырька -  $\delta_{\text{ст}}$ , его диаметр -  $d_{\text{п}}$  и кратность пены -  $K_{\text{п}}$  связаны зависимостью:

$$\delta_{\text{ст}} \sim \frac{d_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}.$$

Если  $d_{\text{п}} = \text{const}$  (монодисперсная пена), то  $\delta_{\text{ст}} \sim f\left(\frac{1}{K_{\text{п}}}\right)$ , и следовательно,

$$S_{\text{п}} = f\left(\frac{1}{t_{\text{окр}}}; D_{\text{п}}; \frac{1}{K_{\text{п}}}\right).$$

Стойкость пены зависит также от высоты пенного слоя. При увеличении высоты слоя пены  $H_{\text{сл}}$  уменьшается скорость выделения жидкой фазы, следовательно, стойкость пены увеличивается. Таким образом, для общего случая можно записать:

$$S_{\Pi} = f \left( \frac{1}{t_{\text{окр}}}; D_{\Pi}; \frac{1}{K_{\Pi}}; H_{\text{сл}} \right).$$

Зависимость стойкости пены от различных факторов и параметров показана на рис. 8.3, 8.4, 8.5.

При тушении пожара стойкость пены будет зависеть и от способа ее подачи.

Условия пенообразования и свойства ПАВ. Чистые жидкости, как правило, пен не образуют из-за высокого коэффициента поверхностного натяжения.

Свойства поверхностно-активных веществ (ПАВ) понижать поверхностное натяжение на границе раздела жидкость - газ или жидкость - жидкость обусловлены способностью молекул ПАВ собираться на поверхности раздела фаз. Это, в свою очередь, определяется строением молекул ПАВ. Молекула ПАВ состоит из гидрофобной части и остатка гидрофильной группы, способного гидратироваться. При введении в жидкость ПАВ происходит адсорбция молекул последнего на поверхности раздела с газовой средой (рис. 8.6). Образуется своеобразный поверхностный слой, в котором молекулы ПАВ ориентированы так, что гидрофильная часть молекулы находится в водной фазе, а гидрофобная направлена в сторону дисперсионной фазы (газовой среды).

Классификация ПАВ основана на особенностях строения их молекул. По этому принципу все ПАВ можно разделить на следующие группы:

в первую группу входят вещества, которые, растворяясь в воде, диссоциируют на ионы, и поэтому называются ионогенными. Их бывает две разновидности - анионоактивные и катионоактивные. Поверхностная активность анионоактивных ПАВ в растворах обусловлена анионами. К ним относятся щелочные соли жирных кислот, алкилсульфаты, алкилсульфонаты щелочных металлов и др. Поверхностная активность катионоактивных ПАВ определяется катионами. Этот класс соединений включает соли аминов, четвертичные аммониевые соли, алкилпиридионовые соли и др.;

во вторую группу входят вещества, которые растворяются в воде, но не подвергаются диссоциации и не образуют ионов - они называются неионогенными. Растворимость неионогенных ПАВ зависит от сродства к воде функциональных групп, а поверхностная активность обусловлена дифильным строением молекул. К таким веществам относятся оксэтилированные жирные

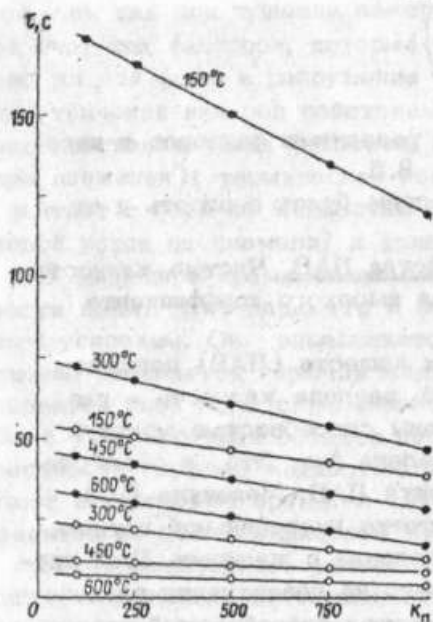


Рис. 8.3. Зависимость стойкости пены от ее кратности и температуры окружающей среды при  $d_{п} = 6,7$  мм и  $d_{п} = 1,5$  мм

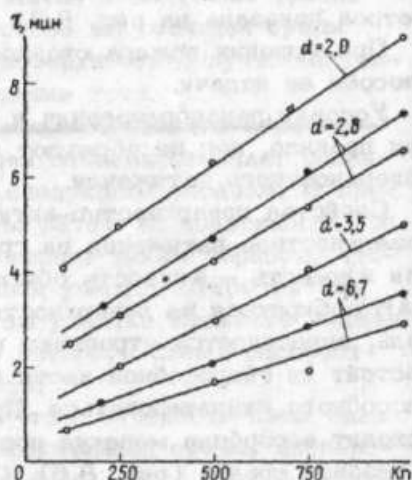


Рис. 8.4. Время выделения 50% жидкой фазы из пены в зависимости от ее кратности и дисперсности при  $V_{п} = \text{const}$

спирты и кислоты, оксиэтилированные фенолы, а также оксиэтилированные амины, амиды и др.

Существуют ПАВ, которые в зависимости от  $pH$  раствора могут проявлять анионоактивные (в щелочной среде) или катионоактивные свойства (в кислой среде). Они называются амфотерными или амфолитными. Подобными свойствами обладают алкиламинокислоты и другие вещества. Поверхностно-активные вещества оцениваются по пенообразующей способности их раствора.

Пенообразующая способность раствора - это количество пены, которое образуется из объема раствора в течение определенного времени. По способности образовывать устойчивые пены пенообразователи разделяются на два рода:

а) пенообразователи первого рода. Это вещества (низшие спирты, кислоты, анилин, крезолы), молекулы которых в объеме раствора находятся в молекулярно-дисперсном состоянии. Пены

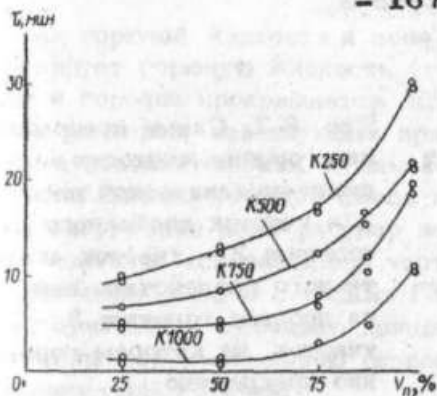


Рис. 8.5

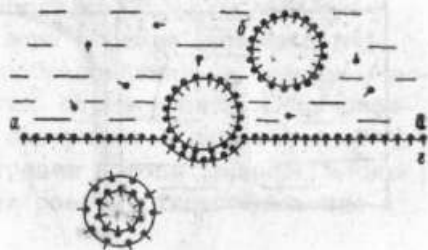


Рис. 8.6

Рис. 8.5. Время разрушения пены в долях объема при различной кратности и  $V_{II} = \text{const}$

Рис. 8.6. Схема образования пузырька пены:  $a$  - адсорбционный слой;  $b$  - пузырек пены;  $v$  - гидрофобная часть молекулы ПАВ;  $z$  - гидрофильная часть молекулы ПАВ

из таких пенообразователей быстро распадаются по мере истечения междупеночной жидкости. Стойкость пен увеличивается с повышением концентрации пенообразователя, достигая максимального значения, а затем падает почти до нуля;

б) пенообразователи второго рода (мыла, синтетические ПАВ) образуют в воде коллоидные системы, пены из них обладают высокой стойкостью. Истечение междупеночной жидкости в таких пенах в определенный момент прекращается, а пенный "каркас" может сохраняться длительное время при отсутствии разрушающих внешних факторов (вибрация, поток воздуха, тепловой поток и др.).

Механизм прекращения горения пеной. Взаимодействие пены с ГЖ с момента ее подачи на горящую поверхность и до образования сплошного слоя пены представляет собой комплекс явлений (рис. 8.7). Упростив достаточную сложность этих явлений, можно выделить ряд основных моментов.

1. Образование локального слоя пены на поверхности горючей жидкости при её тушении зависит от соотношения скоростей двух противоположно направленных процессов: с одной стороны, скоростью разрушения пены на поверхности горючей жид-

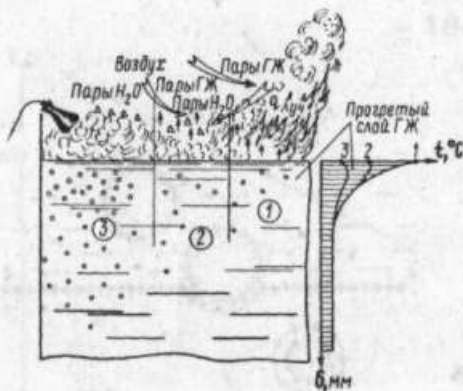


Рис. 8.7. Схема прекращения горения жидкости воздушно-механической пеной; 1 - участок свободного горения; 2 - участок активного воздействия пены на процесс горения; 3 - участок, на котором горение прекращено

кости, а с другой, интенсивностью подачи пены. Если интенсивность подачи пены превышает скорость ее разрушения, то локальный слой на поверхности образуется сразу, и поскольку скорость разрушения пены со временем уменьшается вследствие охлаждения горючей жидкости выделяющимся из пены отсеком, то одновременно увеличивается и скорость нарастания этого слоя и растекание его по поверхности горючей жидкости. Если же интенсивность подачи пены меньше скорости ее разрушения, то локальный слой образуется не сразу, а спустя определенный промежуток времени, в течение которого температура горючей жидкости снизится настолько, что процесс подачи пены начнет превышать ее разрушение.

Охлаждение прогретого слоя горючей жидкости отсеком пены приводит к тому, что уменьшается скорость испарения жидкости, вследствие этого уменьшается концентрация 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 горючей жидкости от лучистого теплового потока пламени и охлаждает верхний прогретый слой. Это приводит к тому, что температура прогретого слоя горючей жидкости падает и, как следствие, уменьшается количество паров, поступающих в зону горения, снижается скорость реакции окисления, количество выделяющегося тепла и температура горения.

3. При достижении на поверхности жидкости слоя пены определенной толщины он препятствует поступлению выделяющихся



паров горючей жидкости к зоне горения. Следовательно, пена изолирует горючую жидкость (точнее, ее пары) от зоны горения и горение прекращается. Кроме перечисленных основных трех факторов, действующих при тушении пеной, существуют еще и дополнительные. К ним относятся:

разбавление горючей смеси в зоне горения парами воды: при разрушении пены раствор пенообразователя (в основном вода) частично испаряется, а частично стекает вниз. Образовавшиеся пары вместе с парами ГЖ поступают в зону горения. Это приводит к снижению концентрации в зоне горения, а следовательно, к уменьшению скорости реакции тепловыделения и температуры горения;

охлаждение зоны горения парами воды. Пары воды, попавшие в зону горения, не только снижают концентрацию горючего в объеме зоны горения, но и охлаждают эту зону. Это увеличивает потери тепла из зоны реакции, а следовательно, уменьшает температуру горения.

Таким образом, надежное тушение может быть достигнуто при подаче на поверхность горючей жидкости такого слоя пены, через который пары горючей жидкости не смогут прорваться в зону горения. Поэтому воздушно-механическая пена относится к изолирующим огнетушащим средствам. Изолирующая способность пены зависит от таких параметров, как парогазо-непроницаемость, коэффициент динамической вязкости, напряжение сдвига, которые, в свою очередь, определяются кратностью пены, ее дисперсностью, толщиной стенки пузыря и др.

Рассмотрим изолирующую способность пены. Предположим, что на горящую жидкость равномерно подан слой пены определенной толщины и эта толщина в течение времени не меняется (квазистационарный случай). Необходимо определить, какую минимальную высоту должен иметь слой пены, чтобы пузырь, несущий в себе пары ГЖ, прорвался через него (рис. 8.8).

Определим, какие силы действуют при взаимодействии пузыря паров горючей жидкости со слоем пены. На слой пены действует сила давления паров горючей жидкости  $F_y$ , ей противостоят сила внутреннего напряжения пенного слоя  $F_r$  и сила, обусловленная массой пены,  $F_{\Pi}$  :

$$F_y = P_{\Pi \cdot y} \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4}; \quad F_r = \pi d_{\Pi} H_{\text{СЛ}}; \quad F_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \rho \left( H_{\text{СЛ}} - \frac{d_{\Pi}}{3} \right),$$

где  $P_{\Pi \cdot y}$  - давление паров упругости жидкости.

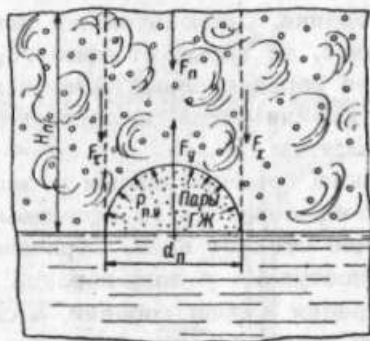


Рис. 8.8. Схема прорыва пузыря ГЖ через слой воздушно-механической пены

Пузырь паров гоючей жидкости не всплывет, если будут соблюдены два условия:

$$H_{сл} > d_{п}; \quad F_{у} \leq F_{п} + F_{г} \quad (8.6)$$

Решение выражения (8.6) после подстановки в него всех значений имеет вид:

$$H_{min} = \frac{\rho_{п.у} - \rho \frac{d_{п}}{3}}{\frac{4r}{d_{п}} + \rho_{п}} \quad (8.7)$$

Выражение (8.7) характеризует изолирующую способность пены в зависимости от ее параметров. Таким образом, огнетушащая эффективность пены может быть оценена по величине  $H_{min}$ , которая является функцией в основном четырех параметров: кратности, дисперсности, вязкости и стойкости пены.

Применение пен. Пена является достаточно универсальным огнетушащим средством и используется для тушения жидких и твердых веществ. Исключение составляют гидрофильные жидкости, электро- и радиоустановки и вещества, взаимодействующие с водой.

Применение пены для тушения пожаров было предложено в 1904 г. русским инженером А.Г. Лораном. Им была получена химическая пена на основе водного раствора сернокислого алюминия и бикарбоната натрия с добавкой в качестве пенообразо-

вателя солодкового экстракта. А.Г. Лоран высказал идею получения воздушно-механической пены и применения ее для тушения пожаров, однако реализовалась эта идея значительно позже.

Химическая и воздушно-механическая пены представляют собой грубодисперсные системы, в которых дисперсной фазой является какой-либо газ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , воздух химически активный ингибитор), а дисперсионной средой - раствор ПАВ в воде.

Для тушения пожаров с успехом применялась химическая пена. Ее получали из пеногенераторного порошка марки ППП путем растворения его в воде. Порошок ППП состоит из кислотной  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и щелочной частей  $\text{NaHCO}_3$  и ПАВ. Химическая пена имеет кратность 5, состоит из 80%  $\text{CO}_2$ , 19,7% водного раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и ПАВ. Применялась химическая пена в основном при тушении нефтепродуктов, так как обладала высокой стойкостью на поверхности горящего нефтепродукта и хорошо растекалась по его поверхности.

В настоящее время для тушения пожаров применяется воздушно-механическая пена. Она состоит из 83-99,6% воздуха и 0,4-1,7% раствора поверхностно-активного вещества.

В качестве поверхностно-активных веществ в пожарной охране применяются:

анионоактивные ПАВ - "Прогресс", сульфонолы НП-1 и НП-5 смачиватель НБ, пенообразователи ПО-1, ПО-3, ПО-6, мылонафт, синтол, ДНС и др. ;

неионогенные ПАВ - смачиватель ДБ, препарат ОС-20, эмульгатор ОП-4, вспомогательные вещества ОП-7, ОП-10. Наиболее распространенное ПАВ-пенообразователь ПО-1. Он представляет собой смесь натриевых солей сульфокислот различного строения. Получается в результате нейтрализации контакта Петрова едким натрием. После нейтрализации к продукту добавляется костный клей и спирт. ПО-1 представляет собой жидкость, хорошо растворимую в воде. Плотность ПО-1 равна 1,1-1,15 г/см<sup>3</sup>, содержание сульфосолей составляет 55%.

Воздушно-механическая пена электропроводна, поэтому для тушения пожаров электроустановок, радиоустановок, электронной техники, электродвигателей, агрегатов транспортных средств и т.д., находящихся под напряжением, не допускается.

### § 8.5. Порошковые огнетушащие средства

В настоящее время для тушения пожаров широкое применение находят порошковые огнетушащие составы (ПОС). По своему назначению они условно делятся на составы общего и специального назначения.

Порошковые составы общего назначения - для тушения пожаров класса АВСЕ. Согласно зарубежной классификации, это соответствует пожарам: А - твердых горючих веществ и материалов, В - горючих жидкостей, С - горючих газов, Е - электроустановок, находящихся под напряжением. Порошковые составы специального назначения применяются для тушения пожаров класса D и других - пожаров, связанных с горением легких и щелочных металлов и их оплавов (т.е. там, где неприменима вода и все виды огнетушащих составов на водной основе). В ряде случаев порошковые составы являются единственным видом огнетушащих средств, пригодных для тушения тех или иных характерных специфических пожаров.

Виды порошковых огнетушащих средств и их состав. Порошковые огнетушащие средства представляют собой тонкодисперсные порошки негорючих твердых веществ, основной составной частью которых являются соли и окислы, например, углекислая и двууглекислая сода, квасцы, поташ, окись кремния, и другие. Дисперсность их достигает 15-20 мкм. В нашей стране наибольшее распространение получили порошковые составы на основе бикарбоната натрия и фосфата аммония. Это, например, составы типа ПСБ на основе бикарбоната натрия, которые успешно применяются для тушения горючих газов, жидкостей, аппаратуры и электроустановок, находящихся под напряжением. Состав типа П-1 и ПФ на основе фосфатно-аммонийных солей применяется при тушении углеродистых твердых горючих материалов. В иностранной литературе принята другая система индексации порошков. Они либо имеют собственные "фирменные" названия типа "Monnex", "Favorit", "Granito" и др. Либо условно называются по классам пожаров, для тушения которых они рекомендуются. Например, ВСЕ (порошок на основе бикарбоната натрия); ABCDE (порошок на основе фосфатов аммония); соответственно первый - для тушения пожаров класса В, С и Е, а второй - для тушения пожаров класса А, В, С, D и Е. Для тушения пожаров, связанных с горением металлов, применяют так называемый М-порошок (различных составов).

Порошки типа ПСБ (и ВСЕ) применяются наиболее широко, имеют наибольшую огнетушащую эффективность и содержат в

своей основе: до 95-96% бикарбоната натрия  $\text{NaHCO}_3$ ; 1-3% стеаратов металлов для улучшения гидрофобных свойств и 1-3% других добавок, повышающих их "текучесть", снижающих склонность к слеживанию и комкованию и т.д. Исследования огнетушащей эффективности различных ПОС позволяют составить определенные представления о механизмах их действия. Установлено, что огнетушащая эффективность порошковых огнетушащих средств возрастает с ростом их дисперсности, практически для всех ПОС (табл. 8.4).

Таблица 8.4

Размер частицы, см	Число частиц в единице массы, шт.	Суммарная поверхность частиц, $\text{см}^2$
1	1	6
0,1	1000	60
0,01	$10^6$	600
0,001	$10^9$	6000
0,0001	$10^{12}$	60000

Число молекул  $\text{H}_2$  в стехиометрической смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  в  $1 \text{ см}^3$  в зоне горения составляет  $n = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$ , а количество химически активных радикалов в зоне такого пламени при температуре  $T = 2000 \text{ К}$  составляет  $n_{\text{акт}} = n_1 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$ ;

$e^{-\frac{E}{RT}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ , тогда  $n_{\text{акт}} = 5 \cdot 10^{16} \cdot 1,7 \cdot 10^{-5} = 8,5 \times 10^{11}$ . При тушении порошком количество эффективных соударений молекул и радикалов в зоне химической реакции горения будет значительно меньше, так как число нейтральных частиц порошка, образованных из  $1 \text{ см}^3$ , соизмеримо с числом активных радикалов, оно составляет  $n_{\text{н.г}} = 10^{11} - 10^{12}$ . Как видно, количество инертных частиц, полученных из  $1 \text{ см}^3$  вещества, действующих по механизму разбавления горючей смеси, препятствующему соударению активных молекул горючего с окислителем, достаточно велико и вполне соизмеримо с количеством возбужденных частиц в зоне реакции.

Значит, прежде всего ПОС действует по механизму простого физического разбавления реагентов в зоне химических реакций (1). Эти частицы малы по массе, а суммарная теплоемкость их и тепловоспринимающая поверхность очень велики. Поэтому прогреваются они быстро и отнимают большое количество тепла от зоны химических реакций (2).

Рассмотрим более подробно действие этого механизма. При прохождении через фронт пламени частицы порошка отнимают часть тепла от него, передаваемого им свежей газовой воздушной смесью. В этом случае тепловой баланс относительно фронта пламени равен:

$$Q_{\text{конв}} = Q_{\text{хим}} - Q_{\text{погл}}$$

где  $Q_{\text{конв}}$  - плотность потока конвективного переноса тепла массой газа;  $Q_{\text{хим}}$  - плотность потока тепла химической реакции;  $Q_{\text{погл}}$  - плотность потока тепла, поглощаемого твердыми частицами.

Плотность потока конвективного тепла, переносимого газом через фронт пламени, определяется равенством:

$$Q_{\text{конв}} = u_{\text{конв}} \rho_{\text{г}} c_{\text{р г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{л}}),$$

где  $u_{\text{конв}}$   $\rho_{\text{г}}$  - массовая скорость переноса тепла газом;  $c_{\text{р г}}$  - средняя теплоемкость газа.

Плотность потока тепла химической реакции будет равна:

$$Q_{\text{хим}} = u_{\text{н}} \rho_{\text{г}} c_{\text{р г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{л}}),$$

где  $u_{\text{н}}$  - нормальная скорость распространения пламени в чистой горючей смеси.

Плотность потока тепла, отбираемого от фронта пламени частицами порошка, может быть определена по формуле

$$Q_{\text{погл}} = u_{\text{конв}} C_{\text{п}} c_{\text{р г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{л}}),$$

где  $C_{\text{п}}$  - концентрация частиц порошка в горючей смеси.

Тепло, воспринимаемое частицами порошка, определяется по уравнению:

$$Q_{\text{погл}} = n_{\text{г}} \pi d_{\text{ср}}^2 \alpha_{\text{п}} (T_{\text{г}} - T_{\text{л}}),$$

где  $n_{\text{г}}$  - количество частиц порошка в горючей смеси;  $d_{\text{ср}}$  - средний диаметр частицы, которая предполагается сферической;  $\alpha_{\text{п}}$  - коэффициент теплопередачи от газа к частице порошка.

Считая, что при тушении пожара порошок равномерно распределяется в зоне горения и что через единицу поверхности горения в равные промежутки времени проходит одинаковое количество порошка, можно определить количество частиц порошка,

находящихся в данный момент на единичной поверхности фронта пламени по формуле

$$n_{\Gamma} = \left( \frac{C_{\Pi}}{1/3 \pi d_{\text{ср}} \rho_{\Pi}} \right)^{2/3},$$

где  $\rho_{\Pi}$  - плотность порошка.

Для тел очень малого размера коэффициент теплопередачи от газа к твердой частице можно рассчитать по формуле и принять равным:

$$\frac{\alpha_{\Pi} d_{\text{ср}}}{\lambda_{\Gamma}} = 2,$$

где  $\lambda_{\Gamma}$  - средняя теплопроводность газа.

После преобразования получим зависимость нормальной скорости пламени от концентрации порошка:

$$\frac{u_{\Pi}}{u_{\text{н}}} = 1 - \frac{\left( \frac{C_{\Pi}}{1/6 \pi \rho_{\Pi}} \right)^{2/3} 2\pi \frac{\lambda_{\Gamma}}{\delta}}{\rho_{\Gamma} c_{p\Gamma} u_{\text{н}}}$$

Экспериментально установлено, что на снижение нормальной скорости распространения пламени большое влияние оказывает размер частиц, чем меньше средний диаметр частиц, тем эффективность тушения возрастает. Так, при концентрации нейтральных твердых частиц в пропано-воздушной смеси, равной  $30 \text{ г/м}^3$  при размере частиц  $d_{\text{ср}} = 8,3 \text{ мк}$ , нормальная скорость пламени меньше, чем в чистой смеси, на 7%, при размере  $d_{\text{ср}} = 5,4 \text{ мк}$  меньше на 15%, а при размере частиц  $d_{\text{ср}} = 1,6 \text{ мк}$  она составляла 60% от нормальной скорости чистой пропано-воздушной смеси. При концентрации  $65 \text{ г/м}^3$  частиц с  $d_{\text{ср}} = 1,6 \text{ мк}$  наблюдалось тушение пропано-воздушного пламени. Более крупными частицами в диапазоне концентраций  $0 - 100 \text{ г/м}^3$  тушения пропано-воздушного пламени не наблюдалось.

Исследованиями также установлено влияние физико-химических свойств горючей смеси на степень снижения нормальной скорости пламени инертными твердыми частицами. Одна и та же концентрация инертного порошка по-разному действует на водородо- и пропано-воздушные горючие смеси. При одной и той

же концентрации инертный порошок снижает нормальную скорость распространения пламени в пропано-воздушной смеси в 1,5 раза больше, чем в водородо-воздушной смеси. При изменении концентрации инертного порошка в водородо-воздушной смеси в диапазоне концентраций 0-100 г/м<sup>3</sup> тушения пламени не наблюдалось.

Кроме того, эти частицы, попадая в зону химических реакций и отнимая тепло от фронта пламени, действуют по механизму "холодной" стенки (3).

Для высокодисперсных порошков при объемном тушении расстояния между отдельными частицами в зоне горения очень малы и образованные между ними каналы имеют размер значительно меньше критического, т.е. при введении порошка в объем проявляется эффект холодной стенки. Число частиц порошка в кубе со стороной  $a$  равно:  $n = \left(\frac{a}{x}\right)^3$ . Масса частицы порошка равна:

$$G_{\text{п}} = \frac{\pi}{6} d_{\text{ср}} \rho_{\text{п}} n = \frac{\pi}{6} \rho_{\text{п}} \left(\frac{a d_{\text{ср}}}{x}\right)^3,$$

$d_{\text{ср}}$  - характеристический размер частицы порошка,

Масса воздуха в выбранном объеме будет равна:

$$G_{\text{т.см}} \approx G_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} a^3 \quad (\text{объемом частиц порошка пренебрегаем}).$$

Для объемного тушения порошками огнетушащие концентрации составляют 50-200 г/м<sup>3</sup>. Тогда

$$\frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{в}}} \approx 0,05 \div 0,2;$$

$$\frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{в}}} = \frac{\frac{\pi}{6} \rho_{\text{п}} \left(\frac{a d_{\text{ср}}}{x}\right)^3}{\rho_{\text{в}} a^3} = \frac{\pi}{6} \frac{\rho_{\text{п}} d_{\text{ср}}^3}{\rho_{\text{в}} x^3};$$

$$\frac{x}{d_{\text{ср}}} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}} \frac{1}{(0,05 \div 0,2)}} = \sqrt[3]{\frac{3,14(1000 \div 1200)}{61,225(0,05 \div 0,2)}} =$$

$$\approx 13 \div 20; \quad x = (13 \div 20) d_{\text{ср}}.$$



Если  $d_{ср} = 20$  мк, то  $x = 0,26-0,4$  мм, что значительно меньше критического диаметра, так как для большинства углеводородных смесей критический диаметр имеет величину  $2+3$  мм.

Если поверхность твердых частиц не нейтральна, а химически активна по отношению к радикалам зоны химических реакций, то они еще более эффективны и действуют как газообразные ХАИ. Например,  $МОН + Н \rightarrow Н_2О + М$ ;  $МОН + ОН \rightarrow Н_2О + МО$ , где  $М$  - это  $K, Na$  и др., т.е.  $\dot{A} + П \rightarrow АП$ ;  $АП + А \rightarrow АА+П$ , где  $А$  - активная частица (радикал);  $П$  - твердая поверхность частиц.

Эффективность таких ингибиторов тем выше, чем легче они отдают электрон радикалам. Так происходит дезактивация активных центров.

Таким образом, существенен и механизм гетерогенной рекомбинации активных центров химической реакции на поверхности твердых частиц порошковых огнетушащих составов (4). Если частицы ПОС, находясь в зоне химической реакции, разлагаются, сублимируют, выделяя газовые компоненты, то очевидно, что и этот эндотермический процесс ведёт к дополнительному отводу тепла от зоны химических реакций (5) и к разбавлению ее парами и газами (6), а если ещё испарившиеся продукты являются ХАИ, как в случае составов типа  $SiCl_4$ , когда силикагель пропитывается жидким фреоном  $F 114B_2 (C_2F_4Br_2)$ , то к этому добавляется еще и механизм химического ингибирующего воздействия продуктов разложения ПОС (7). Если же частицы порошка не полностью разложились и испарились в зоне химической реакции, то, оседая вниз, они покрывают поверхность горючих материалов (если тушат ТГМ) и оказывают экранирующее (8) и изолирующее (9) воздействие на горючие материалы, препятствуя доступу воздуха в зону шролиза горючих материалов и выходу горючих продуктов разложения.

Как видно, механизмы прекращения горения ПОС многообразны, а доминирующий механизм зависит от вида горючего, режима горения, вида применяемого ПОС и даже от способов подачи его в зону горения.

Для тушения пламени газового фонтана наиболее целесообразно применение ПОС с объемными механизмами прекращения горения: разбавление, химическое ингибирование, гетерогенная рекомбинация активных центров химических реакций и т.д. А это, в свою очередь, определяет и способ, и зону их наиболее эффективной подачи: рассредоточенно, объемно, "снизу вверх", преимущественно в факел пламени.

При тушении щелочных металлов, когда основным является механизм "изоляции", "экранирования" и хоть и слабого, но охлаждающего действия (10) порошковой массы на поверхности ТГМ, подача ПОС должна осуществляться таким образом, чтобы образовался более толстый слой порошка на поверхности ТГМ (т.е. "сверху вниз" или "сбоку", "компактно", "сосредоточенно" и т.д.), чтобы аэродинамические силы факела пламени и газовые потоки вокруг зоны горения унесли как можно меньше порошка.

Достоинствами ПОС является их универсальность и высокая огнетушащая эффективность. Им свойствен и целый ряд недостатков. Большинство ПОС гидрофильны, склонны к отсыреванию, увлажнению, слеживанию и комкованию. Порошковые составы сложно подавать в зону горения: их трудно "забирать" из объема, где они находятся, для подачи в нагнетающее устройство; им трудно сообщить большой запас механической энергии (они "не работают" в насосах, в системах нагнетания); их трудно транспортировать по трубопроводам и подавать в "свободном полете" в зону горения. Поэтому для "забора", "транспортировки" и "подачи" ПОС в зону горения применяют преимущественно пневмотранспорт. Максимальная дальность полета струи воздушно-порошковой смеси в этом случае редко превышает 10-15 м для ручных стволов и 20-25 м для лафетных, а длина подающих шлангов не превышает 50-60 м. Для гидрофобизации ПОСов применяют различные способы обработки их, вводят добавки, которые препятствуют слеживанию и повышают скольжение частиц, т.е. придают порошковым составам свойства "текучести". К их числу относятся стеараты металлов (стеарат алюминия, стеарат железа или магния), стеариновая кислота, графит. Для обработки порошковых составов применяют силиконовые жидкости, добавляют тальк, флюсы и т.п.

В табл. 8.5 приведена область применения порошковых огнетушащих средств общего назначения. Они непригодны для тушения металлов, металлоорганических жидкостей, щелочных металлов, пирофорных веществ и их сплавов.

В табл. 8.6 приведена область применения порошковых огнетушащих средств специального назначения.

Расход ПОС и интенсивность их подачи при тушении пожаров определяется экспериментально. Расчет интенсивности подачи ПОС ведется в основном на единицу площади пожара. Данные по тушению различных горючих материалов порошковыми огнетушащими средствами приведены в табл. 8.7, 8.8, 8.9, 8.10.

23-2

Тип	Основные физические параметры	Примерный состав	Область применения
ПСБ-1 ПСБ-2 ПСБ-3 и др.	$d_{\text{хар}} = 70 \text{ мкм}$ $s_{\text{уд}} = (2,5 \div 3) \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right]$ $\gamma_{\text{пос}} = 0,9 \div 1,2 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Бикарбонат натрия, 10%, талька, 1-2% АМ-1-300 (кремниевая органическая добавка)	Предназначены для тушения горючих веществ и материалов во всех трех агрегатных состояниях (горючие газы, ЛВЖ-ГЖ, твердые горючие материалы) и электроустановки под напряжением до 1000 В.
ПФ (ПФ-1, ПФ-2 и др.)	$d_{\text{хар}} = 70 \div 100 \text{ мкм}$ $s_{\text{уд}} = (1,5 \div 2) \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right]$ $\gamma_{\text{пос}} = 0,7 \div 1 \left[ \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$	Фосфорно-аммонийные соли, 5% талька, 1-2% АМ-1-300	Все те же виды пожаров, плюс пожары твердых горючих материалов, склонных к тлению (углеродистых материалов)
П (П-1, П-2 и др.)	$d_{\text{хар}} = 80 \div 100 \text{ мкм}$ $s_{\text{уд}} = 1,3 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{г}} \right]$ $\gamma_{\text{пос}} = 0,8 \div 1 \text{ г/см}^3$	Фосфорно-аммонийные соли с добавками АМ-1-300	Область применения та же, что у составов типа ПФ

Таблица 8.6

Тип	Основные физические параметры	Примерный состав	Область применения	Примечание
ПС (ПС-1, ПС-2 и др.)	$d_{\text{хар}} = 100 \div 150 \text{ мкм}$ $\rho_{\text{пос}} = 0,5 \div 0,8 \text{ г/см}^3$	Углекислый натрий, 2,5% стеарата металла, 1% графита	Предназначены для тушения щелочных и щелочноземельных металлов, пирофорных материалов	
СИ (СИ-1, СИ-2 и др.)	$d_{\text{хар}} = 0,2 \div 2,0 \text{ мм}$ $\rho_{\text{пос}} = 0,8 \div 0,95 \text{ г/см}^3$	Силикагель (марки МСК, ЦСК или КСК) - 50% (масс), фреон 114В2, - 50% (масс.)	Предназначены для тушения пожаров, связанных с горением алюмоорганических соединений, пирофорных материалов и т.д.	Механизм тушения как объемного действия, за счет выделения газообразных ХАИ, так и поверхностно-изолирующего действия твердой массы остатков силикагеля

Таблица 8.7

## Тушение горючих жидкостей порошком ПСБ

Горючая жидкость	Площадь пожара, м <sup>2</sup>	Интенсивность подачи, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Тип оборудования	Время	
				горения, мин	тушения, с
Толуол	100	0,2	Лафетный ствол	0,5	66
Диэтиловый эфир	6	0,5	ОП-100	0,5	4 возможно повторное воспламенение
Дихлорэтан	6	0,14	ОП-10	3,0	5
Бензин	3,5	0,3	ОП-10	0,5	8
	40	0,5	лафетный ствол	3,0	17
Спирт этиловый	58	0,25	Стационарная установка	10	5-14
Топливо Т-1	100	0,025	Лафетный ствол	3	40

Таблица 8.8

## Тушение натрия, перегретого до 500°С порошком ПС-1

Площадь горения, м <sup>2</sup>	Количество металла, кг	Высота слоя металла, мм	Количество порошка	
			кг/м <sup>2</sup>	кг/кг
5	100	22	34	1,7
5	175	35	35	1,0

Таблица 8.9

## Тушение горючих жидкостей порошком СИ-2

Горючая жидкость	Площадь пожара, м <sup>2</sup>	Интенсивность подачи, кг/(м <sup>2</sup> · с)	Тип оборудования	Время тушения, с
Толуол	8	0,81	Опытный огнетуш.	12
Диэтиловый эфир	2	0,36	СИ-100	19

Тушение алюминийорганических соединений порошком СИ-2 достигается при расходе 20 кг/м<sup>2</sup>

Таблица 8.10

## Тушение фонтана природного газа порошком ПСБ

Дебет, м <sup>3</sup> /сут-ки	Тип оборудования	Расход порошка, кг/с	Время тушения, с
2 · 10 <sup>6</sup>	Лафетный ствол	20	13
0,68 · 10 <sup>6</sup>	Два ручных ствола	2,5	60
19 · 10 <sup>3</sup>	ОП-10	0,5	3±7

## § 8.6. Вода как огнетушащее средство

Вода является одним из наиболее широко распространенных и наиболее универсальных средств, применяемых для тушения пожаров. Она эффективна при тушении пожаров, связанных с горением веществ, находящихся во всех трех состояниях. Поэтому ее широко применяют для тушения пожаров практически повсеместно, кроме тех редких случаев, когда ее применить нельзя. Воду нельзя применять для тушения пожаров в следующих случаях:

нельзя тушить горючие вещества и материалы, с которыми вода вступает в интенсивное химическое взаимодействие с выделением тепла или горючих компонентов (например, пожары, связанные с горением щелочных и щелочно-земельных металлов,

металлов типа лития, натрия, карбида кальция и других, а также кислот и щелочей, с которыми вода бурно взаимодействует);

водой нельзя тушить пожары, с температурой выше 1800-2000<sup>o</sup>C, так как при этом возникает интенсивная диссоциация паров воды на водород и кислород, которые интенсифицируют процесс горения;

нельзя тушить пожары, при которых применение воды не обеспечивает требуемых условий безопасности для личного состава. Например, пожары электроустановок, находящихся под высоким напряжением, и т.д.

Во всех остальных случаях вода является надежным, эффективным средством для тушения пожаров и поэтому она нашла наиболее широкое применение. Вода обладает рядом достоинств как огнетушащее средство: термической стойкостью\*, намного превышающей термическую стойкость других негорючих жидкостей, высокой теплоемкостью и теплотой испарения, относительной химической инертностью. К отрицательным свойствам воды относятся: высокая температура замерзания и аномалия изменения плотности воды при охлаждении, что затрудняет ее применение при низких отрицательных температурах, сравнительно малая вязкость и высокий коэффициент поверхностного натяжения, ухудшающие смачивающие способности воды и тем самым снижающие коэффициент ее использования в процессе тушения, а также электропроводность воды, содержащей примеси.

Основные физико-химические свойства воды следующие:

плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

температура замерзания  $t_{\text{зам}} = 0^{\circ}\text{C}$ ;

температура кипения  $t_{\text{кип}} = 100^{\circ}\text{C}$ ;

плотность насыщенного водяного пара при 100<sup>o</sup>C и  $p = 98,1 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ;  $\rho_{\text{п}} = 0,6 \text{ кг/м}^3$ ;

критическая температура  $t_{\text{крит}} = 374^{\circ}\text{C}$ ;

удельная теплоемкость жидкости  $c_{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;

удельная теплоемкость паров (в диапазоне температур от 100 до 1000<sup>o</sup>C)  $c_{\text{р}} = 2,52 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;

скрытая теплота парообразования  $r = 2260 \text{ кДж/кг}$ ;

коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{в}} = 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ ;

коэффициент динамической вязкости  $\mu_{\text{в}} = 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ ;

\* Незначительное термическое разложение воды (~ 0,2%) начинается при температуре около 1500<sup>o</sup>C, что значительно выше обычных температур на пожаре.

удельная электрическая проводимость (чистой воды) при 20°С

$$\frac{1}{R} = 400 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} .$$

По механизму прекращения горения вода относится к категории охлаждающих огнетушащих средств. Но сам механизм прекращения горения зависит от режима горения, от вида горючего и его агрегатного состояния. При тушении пожаров, связанных с горением горючих газов (всегда) и жидкостей (иногда) доминирующим механизмом прекращения горения является охлаждение зоны горения, который реализуется в случае применения объемного метода тушения. Поэтому рассмотрим сначала механизм прекращения процессов горения водой при объемном методе, который применяется при тушении пожаров, связанных с горением горючих газов, жидкостей и ТГМ.

При объемном методе тушения (разбавлением, ингибированием цепных реакций или охлаждением зоны реакций) наиболее целесообразно подавать огнетушащее средство в зону горения или в зону протекания химических реакций горения "объемно", т.е. заполняя им максимально возможную часть объема в зоне горения. Воду можно подавать в зону горения в виде компактных струй, распыленных струй и тонкораспыленной воды. Два последних случая наиболее полно соответствуют понятию объемной подачи жидкого огнетушащего средства в зону горения. Компактная струя, пройдя сквозь зону горения, не окажет на нее почти никакого воздействия, да и сама практически не испытывает сильного влияния пламени. Далее, взаимодействуя с горячим материалом, она окажет на него некоторое воздействие, но оно будет не столь эффективным. Через слабую струю газа водяная струя также пройдет без всякого взаимодействия, не влияя на состояние газа (или газовой смеси) и не испытывая особого воздействия от него.

При взаимодействии компактной водяной струи с интенсивным газовым потоком (у самого устья скважины, где огромные скорости потока газа, сравнительно большая плотность и высокий газодинамический напор), она раздробится, а если их много, то они раздробят и газовую струю. Но в условиях пожара - это процесс трудно управляемый и трудно регулируемый. Поэтому подавать компактную струю в факел пламени горящих газов нецелесообразно. Компактную струю можно подавать в следующих случаях.

1. Когда необходимо "поднять" нижнюю кромку факела пламени, т.е. увеличить "мертвую зону". Например, для примене-



ния способа тушения взрывом ВВ или с помощью АГВТ; для вывода на боевую позицию технических средств тушения, технических устройств для аварийно-восстановительных работ и т.д.

2. Когда личному составу невозможно подойти к фонтану на оперативную дистанцию для выполнения боевых действий по тушению и вспомогательных работ; для защиты от загорания близлежащих объектов и т.д.

При тушении ЛВЖ и ГЖ компактная струя также не окажет на факел пламени почти никакого воздействия. А попав на поверхность ЛВЖ и ГЖ, она будет не очень эффективно ее охлаждать. Из-за большого удельного веса воды по сравнению с горючими углеводородами она быстро опустится на дно. Охлаждение прогретых до температуры кипения поверхностных слоев горючей жидкости будет не столь интенсивным, как если бы была подана распыленная или тонкораспыленная вода. При тушении ТГМ компактные струи воды, поданные в факел пламени, также, как и в первых двух случаях, не окажут влияния на зону горения, а попав на поверхность ТГМ, они не очень эффективно будут их охлаждать и тем самым будут мало способствовать тушению.

Мощные компактные струи воды подают при тушении крупных развившихся пожаров штабелей древесины, так как при таком интенсивном горении распыленные струи, а тем более тонкораспыленная вода не долетят не только к горящей древесине, но даже не попадут внутрь факела пламени. Они испарятся во внешних зонах факела пламени или унесутся вверх интенсивными газовыми потоками, практически не повлияв на процесс горения.

Во всех остальных случаях распыленные струи и тонкораспыленная вода более эффективны как при тушении пожаров объемным способом, так и при тушении по поверхности горючего материала. При прекращении пламенного горения компактная струя менее эффективна потому, что, пролетая сквозь зону горения, не обеспечивает охлаждающего воздействия, так как она имеет небольшую площадь поверхности контакта с пламенем и малое время взаимодействия. Тогда как распыленные струи имеют значительно большую поверхность контакта с факелом пламени и меньшую скорость пролета - большее время взаимодействия. А еще лучше условия теплоотвода из факела пламени у тонкораспыленной воды. По законам теплопередачи количество тепла, отнимаемое теплом от газовой среды, описывается уравнением вида:

$$Q = S r a (T_{г.с} - T_{II}).$$

Значит, чем больше поверхность контакта жидкости с факелом пламени и время этого контакта при прочих равных условиях, тем интенсивнее теплоотвод. Очень малое тепловое и аэродинамическое взаимодействие с факелом пламени у компактной струи, большее - у распыленной, еще большее - у тонко-распыленной воды, подаваемой в зону пламени. Наибольший эффект тушения при подаче воды в факел пламени будет в том случае, когда ее охлаждающий эффект будет максимальным. То есть когда вся поданная на тушение пожара вода испарится за счет отвода тепла от факела пламени, непосредственно из зоны протекания химических реакций горения. Поэтому при таком механизме прекращения горения следует стремиться к тому, чтобы максимально возможное количество воды испарялось в объеме факела пламени, а не за его пределами. А при тушении водой путем подачи ее на поверхность горючих жидкостей или ТГМ более равномерная подача распыленной воды эффективна потому, что максимальный охлаждающий эффект будет иметь место при полном испарении всей поданной на тушение пожара воды за счет отъема тепла от горючего материала. Поэтому вода должна находиться в контакте с поверхностными (наиболее прогретыми) слоями ЛВЖ, ГЖ или ТГМ до полного ее испарения.

Наибольшее время контакта капли с факелом пламени будет при скорости полета капли, близкой к скорости витания, т.е. когда сила веса капли уравновешена силой аэродинамического взаимодействия капли с потоком газа. Откуда скорость витания капли в зависимости от соотношения плотностей жидкости и газа и диаметра капли, можно найти по формуле

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_k g}{c_x} \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}}}$$

Или, зная скорость восходящих газовых потоков в газовой колонке над факелом пламени, диаметр капли, способной к витанию, можно определить по формуле

$$d_k = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{г} v_{\text{вит}}^2}{g \rho_{ж}} \quad \text{или} \quad r_k = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{г} v_{\text{вит}}^2}{2} \frac{1}{\rho_{ж} g}$$

Поверхность теплообмена будет тем больше, чем меньше диаметр капли. Если капли очень маленького диаметра ( $d_k \ll d_k^{\text{вит}}$ ),

то поверхность их контакта будет достаточно большая, масса капель незначительна, но при подаче извне они не дойдут до зоны пламени, а унесутся вверх конвективными газовыми потоками и не повлияют на процесс горения. Значит размер капель, т.е. степень их дисперсности (мелкость их распыла) и одновременно время пребывания их в зоне горения должны быть таковы, чтобы произведение этих параметров было максимальным (т.е.  $\Sigma \times r \rightarrow \max$ ). Это условие обеспечит максимальный отвод тепла из зоны химических реакций горения.

Механизм прекращения пламенного горения водой. Если в факел пламени подать тонкораспыленную воду, то значительная ее часть или почти вся вода испарится, отняв максимальное количество тепла. Допустим, что вся вода, поданная в зону пламени, полностью испарится. Рассмотрим механизмы прекращения горения для этого случая. Основные механизмы отвода тепла и механизмы прекращения горения будут следующие: снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на нагревание капелек воды до температуры кипения:

$$q_1 = c_{\text{в}} m_{\text{в}} \Delta t = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (t_{\text{кип}} - t_0);$$

снижение температуры в факеле пламени из-за затрат тепла на парообразование (т.е. на испарение)

$$q_2 = \cdot r m_{\text{в}};$$

снижение температуры факела пламени за счет смешения паров воды при  $t = 100^{\circ}\text{C}$  и реагентов в зоне реакции и затраты тепла на нагревание паров воды до температуры среды в зоне горения.

$$q_3 = c_p^{\text{в.п}} m_{\text{в}} \Delta t_{\text{п}} = c_p^{\text{в.п}} m_{\text{в}} (t_{\text{пл}} - 100);$$

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

изменение теплофизических свойств газовой среды в зоне горения  $c_{\text{р см}}$ ;  $\lambda_{\text{см}}$  и др.

Оценим, приблизительно, удельные расходы воды и требуемые интенсивности подачи ее для эффективного тушения факела пламени при всех трех агрегатных состояниях горючих материалов по механизму прекращения горения только за счет охлаждения зоны реакции.

Максимальная температура факела диффузионного пламени любого горючего вещества или материала составляет 1200-1300°C и очень редко превышает 1350°C. Так, температура пламени горючих газов при диффузионном горении в открытом пространстве составляет 1250-1300°C (кроме водорода), горючих жидкостей при тех же условиях - 1200-1250°C, твердых горючих веществ и материалов - 1150-1200°C.

Согласно тепловой теории потухания пламени, условно принято, что температурой потухания для большинства углеводородных горючих веществ и материалов является 1000°C.

Предположим, что начальная температура реагентов, т.е. смеси горючего с окислителем (смеси горючего газа с воздухом или паров ЛВЖ, ГЖ с воздухом) была равна  $T_0 = 300$  К (т.е. если взять их при "нормальных" условиях  $\sim 27^\circ\text{C}$ ), а наивысшая температура продуктов горения, примерно равная температуре факела пламени,  $t_{\text{пл}} = 1200^\circ\text{C}$  или  $T_{\text{пл}} = 1500$  К. Это значит, что температура среды в зоне горения повысилась приблизительно на 1200 К. На повышение температуры в зоне горения пошло примерно 60% всей теплоты сгорания данного вида горючего ( $\sim 0,6 Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ ), (за вычетом потерь на излучение в окружающую среду, на которое пошло  $\sim 0,4 Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ ). А снизить температуру факела пламени необходимо на  $\Delta T_{\text{пот}} = 200$  К, т.е.  $\frac{200}{1200} = 0,17$ , т.е. примерно на 1/6 прироста температуры в зоне горения или на 17%. Если предположим, что прирост температуры продуктов горения пропорционален количеству тепла, выделяемого в результате химических реакций горения, за вычетом теплотерь на излучение, то для потухания пламени необходимо снизить количество выделяемого тепла еще на  $\sim 17\%$  или отвести от факела пламени дополнительно 17% тепла из тех 60%, которые идут на повышение температуры зоны реакции  $\Delta Q_{\text{отв}} = 17\% Q_{\text{пл}}$ , где  $Q = 60\% Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ . Это значит, что при тушении пламени по механизму прекращения горения охлаждением зоны горения для диффузионных пламен горючих газов, паров ЛВЖ, ГЖ и твердых горючих материалов, необходимо отвести от зоны горения дополнительно 1/6 часть тепла, идущего на повышение температуры среды в факеле пламени, что составляет  $1/6 \cdot 60\% Q_{\text{H}}^{\text{P}}$ , т.е.  $\sim 10\%$  от их теплоты сгорания.

Поскольку теплота сгорания большинства газообразных и жидких углеводородных горючих веществ редко превышает  $(40 \div 50) 10^3$  кДж/кг, то для этого вида горючих удельное количество тепла, которое следует дополнительно отвести от

диффузионного пламени для его тушения по механизму прекращения горения охлаждением зоны горения, составляет:

$$\Delta Q_{\text{отв}}^{\text{уд}} \approx 0,1 Q_{\text{н}}^{\text{р}} = (4+5) 10^3 \text{ кДж/кг.}$$

Определим количество воды, требуемой для отвода такого количества тепла от зоны горения и тушения факела пламени по механизму прекращения горения охлаждением факела пламени.

Количество тепла, отведенное водой в расчете на один килограмм будет равно:  $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} = Q_{\text{нагр}}^{\text{в}} + Q_{\text{исп}}^{\text{в}} + Q_{\text{нагр}}^{\text{п}}$ ; или учитывая, что  $m_{\text{п}} = m_{\text{в}}$  получим:

$$Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} = m_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} + m_{\text{в}} r_{\text{в}} + m_{\text{п}} c_{\text{р}} \Delta t_{\text{п}},$$

где  $m_{\text{в}}$  - масса воды, принятая условно равной 1 кг;  $c_{\text{в}}$  - теплоемкость воды, равная 4,2 кДж/(кг · °С);  $\Delta t_{\text{в}}$  - диапазон прогрева воды от начальной температуры (условно примем ее равной 20°С) до  $T$  кипения;  $r_{\text{в}}$  - скрытая теплота парообразования, равная 2270 кДж/кг;  $c_{\text{р}}$  - теплоемкость паров воды в диапазоне температур от 100° до 1000°С, условно принятая равной ее среднему значению 2 кДж/(кг · °С);  $\Delta t_{\text{п}}$  - диапазон нагрева паров воды в зоне пламени от 100 до 1000°С.

Подставив численные значения входящих величин, получим:

$$Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} \approx 4400 \text{ [кДж/кг]},$$

т.е. один литр воды, введенной в зону горения при полном ее испарении и нагревании паров воды до наименьшей температуры пламени, способен отнять от факела пламени 4400 килоджоулей тепла. Это значит, что для тушения диффузионного факела пламени самых высококалорийных углеводородных горючих с  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} (40-50) 10^3$  кДж/кг нужно подать в факел пламени:

$$q_{\text{в}}^{\text{уд}} = \frac{\Delta Q_{\text{отв}}}{\Delta Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}}} = \frac{0,1 Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{4400} \approx 1 \text{ (кг/кг)},$$

т.е. примерно 1 л воды на килограмм горючей жидкости или на 1 кг горючего газа.

Однако необходимо помнить, что полученные численные значения удельных расходов воды носят расчетно-теоретический характер. Практически невозможно осуществить подачу воды в

факел пламени, доведя его до полного потухания, и при этом обеспечить полное испарение всей воды и нагревание ее паров до температуры газовой среды, т.е. до  $1000^{\circ}\text{C}$ . Предположим, что не вся вода попадет при распыле в факел пламени, а только 80% ее, не вся вода, попавшая в факел пламени, нагреется до  $100^{\circ}\text{C}$ , а лишь 90%, не вся нагретая до температуры кипения вода испарится, а только 75% ее и что пары воды прогреются примерно до  $750^{\circ}\text{C}$ , то и в этом случае количество тепла, отведенное от факела пламени, будет равно:

$$Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} = k_1 k_2 m_1 c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} + k_1 k_2 k_3 m_{\text{в}} r_{\text{в}} + k_1 k_2 k_3 k_4 m_{\text{п}} c_{\text{р}}^{\text{п}} \Delta t_{\text{п}},$$

где  $k_1 = 0,8$ ;  $k_2 = 0,9$ ;  $k_3 = 0,75$ ;  $k_4 = 0,75$ .\*

Даже в этом случае после подстановки численных значений входящих величин получим  $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} = 2200$  кДж/кг; т.е. примерно вдвое меньше полученного ранее значения\*\*. Соответственно и требуемые удельные расходы воды, необходимые для прекращения пламенного горения, будут в два раза больше полученных выше значений  $q_{\text{уд}}^{\text{в}} = \frac{0,1 Q_{\text{н}}}{2200} \approx 2$  л/кг. Но и эти значения в 5-10 раз меньше реализуемых на практике. Это обстоятельство показывает, какие большие резервы повышения огнетушащей эффективности воды по механизму охлаждения факела пламени скрыты в совершенствовании способов подачи воды в зону горения, в повышении коэффициента ее использования в процессе тушения некоторых видов пожаров.

Все приведенные выше расчеты были построены на тепловом эффекте тушения, без учета таких механизмов прекращения горения, как простое разбавление зоны реакции горения парами воды, изменение теплофизических свойств паро-газовой смеси в зоне протекания химических реакций горения и т.д.

Рассмотрим механизм прекращения горения разбавлением зоны реакции парами воды при подаче ее в факел пламени. Расчет произведем на примере тушения факела пламени природно-

\* Численные значения коэффициентов  $k_1 - k_4$  приняты произвольно.

\*\* Несмотря на то, что численные значения коэффициентов  $k_1 - k_4$  были выбраны произвольно, полученная величина  $Q_{\text{отв}}^{\text{уд(в)}} = 2200$  кДж/кг хорошо согласуется с данными, полученными зарубежными исследователями экспериментальным путем при прекращении пламенного горения твердых горючих материалов типа древесины.

го газа, содержащего в своем составе более 90% метана.

Как известно, стехиометрическая концентрация метана в метано-воздушных смесях ~10% по объему, т.е. из 1 м<sup>3</sup> горючего газа образуется приблизительно 10 м<sup>3</sup> горючей метано-воздушной смеси.

Полученный удельный расход воды на тушение факела диффузионного пламени метана приблизительно равен 2 л/кг. Известно, что 1 л воды при полном ее испарении дает 1700 л водяного пара.

Если предположить, что в процессе тушения испарилась вся<sup>3</sup> поданная вода, то объем образовавшихся паров будет  $V_{в.п} = 3,5 \text{ м}^3$ , т.е.  $d_{в.п} = 3,5 \cdot 100/28 + 3,5 = 12\%$ , т.е. почти на половину той концентрации, которая нужна для прекращения процесса горения разбавлением зоны горения.

Рассмотрим механизм прекращения процессов горения на пожаре с помощью воды, используемой в качестве огнетушащего средства, - охлаждением горючих веществ и материалов. Таким способом можно тушить главным образом жидкие и твердые горючие материалы.

Общее количество тепла, которое необходимо отвести из зоны горения по механизму прекращения горения охлаждением горючей жидкости, можно рассчитать по следующей схеме.

Для жидкостей, не образующих гомотермического слоя, толщина прогретого слоя почти не зависит от времени горения и примерно постоянна для каждого вида горючей жидкости. Обычно эта толщина составляет от 3-5 мм до 3-5 см. Количество тепла, которое необходимо отвести от горючей жидкости, можно рассчитать по формуле

$$Q_{отв} = V_{ж} c_{ж} \Delta t = F_{ж} \delta_{п.с} (t_{ж} - t_{в.сл}) k_t c_{ж},$$

где  $F_{ж}$  - площадь поверхности горючей жидкости (площадь резервуара);  $\delta_{п.с}$  - толщина слоя жидкости, прогретого выше температуры вспышки;  $k_t$  - коэффициент, учитывающий форму профиля поля температур в поверхностном слое ( $k_t \approx 0,5$ );  $c_{ж}$  - теплоемкость жидкости;  $t_{ж} = t_{кип}$  - температура поверхностного слоя горючей жидкости, обычно равная температуре кипения горючей жидкости;  $t_{всп}$  - температура вспышки горючей жидкости.\*

\* Предполагается, что температура вспышки горючей жидкости выше ее начальной температуры и температуры окружающей среды  $t_{всп} > t_{окр}^0$ .

Все эти величины можно найти по справочникам, кроме  $\delta_{п.с}$ , которую определяют экспериментально, для каждого вида горючей жидкости.

При длительном тушении, когда необходимо учитывать количество тепла, поступающее от факела пламени к зеркалу горючей жидкости, численное значение величины  $Q_{отв}$  должно быть увеличено на

$$\Delta Q_{\Phi.п} = q_{луч} F_{г.ж} r_T,$$

где  $q_{луч}$  - лучистый тепловой поток от факела пламени к зеркалу поверхности горючей жидкости; для ЛВЖ, ГЖ он обычно равен  $(0,02-0,03) \bar{Q}_H$ ;  $r_T$  - время тушения.

Тогда суммарное количество тепла, которое следует отвести от горючей жидкости водой, подаваемой на тушение пожара, будет равно:

$$Q'_{отв} = Q_{отв} + \Delta Q_{луч.п}^{ср.п.}$$

Для жидкостей, образующих в процессе горения гомотермический слой, задача расчета количества тепла, которое следует отвести от горючей жидкости для прекращения горения, осложняется тем, что толщина прогретого слоя пропорциональна времени свободного развития пожара:

$$Q_{отв} = F_{г.ж} v_{гт.с} r_{с.р} c_{ж} (t_{гт.с} - t_{всп}),$$

где  $v_{гт.с}$  - скорость роста толщины гомотермического слоя горючей жидкости, м/с;  $r_{с.р}$  - время свободного развития пожара;  $t_{гт.с}$  - средняя температура гомотермического слоя горючей жидкости.

Условием успешного тушения пожара по такому механизму прекращения процесса горения является выполнение неравенства

$$Q_B > Q_{отв}.$$

Рассмотрим механизм прекращения горения и удельные расходы воды при применении ее в качестве охлаждающего огне-тушащего средства для тушения пожаров твердых горючих материалов. При тушении пожаров, связанных с горением ТГМ водой полного прекращения процессов горения можно добиться



только путем охлаждения до определенной температуры самого горючего материала. Во-первых, потому, что прекращение пламенного диффузионного горения еще не означает прекращения горения вообще, так как многие из них способны к гетерогенному горению (тлению). Во-вторых, поверхностный слой этих материалов в процессе горения прогревается до температуры, значительно превышающей не только температуру самовоспламенения, но даже температуру вынужденного зажигания (т.е. до температуры выше  $500-600^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому после прекращения пламенного горения над их поверхностью вновь создаются условия, достаточные для повторного воспламенения и продолжения горения. Поэтому условием полного и надежного прекращения горения этих материалов является не только прекращение пламенного горения над их поверхностью, но и охлаждение поверхности этих материалов и их прогретых поверхностных слоев до температуры ниже температуры начала выхода горючих летучих фракций или начала их пиролиза.

Процесс тушения представим таким образом, что на всю поверхность ТГМ равномерно наносится слой воды заданной толщины за достаточно короткий промежуток времени практически одновременно. А полное время тушения примем условно равным 10 с, что практически вполне осуществимо и хорошо подтверждается экспериментально в лабораторных условиях. Предположим также, что нанесенный слой воды требуемой толщины не стекает с контролируемой поверхности (т.е. что вся поданная вода полностью участвует в процессе тушения).

Тогда задача сводится к определению (расчету) требуемой толщины слоя воды на поверхности ТГМ  $\delta_B$ , необходимой для полного прекращения процесса горения. Для выбора схемы расчета рассмотрим некоторые основные механизмы прекращения горения при подаче воды на поверхность горящего материала. Как и в предшествующих случаях, пренебрежём: охлаждающим действием воды на зону пламени (на зону протекания химических реакций горения); экранирующим воздействием слоя воды на поверхности ТГМ, который в течение какого-то времени будет находиться на ней и защищать ее от лучистого и конвективного тепловых потоков зоны горения; изолирующим эффектом воды, который она будет оказывать в течение какого-то промежутка времени, впитываясь в поверхностный слой горючего материала до момента ее полного испарения и некоторыми др.

Остановимся лишь на доминирующем механизме - механизме прекращения горения охлаждением поверхностного слоя горящего

материала водой, т.е. за счет нагревания ее до температуры кипения и ее испарения. Для простоты изложения не будем принимать в расчет даже разбавляющий эффект паров воды в зоне пламенных реакций горения и охлаждающий эффект паров воды.

Задавшись такой моделью процесса горения и такой схемой тушения, можно приближенно рассчитать количество воды, необходимое для прекращения горения охлаждением ТГМ. Предположим, что горение прекратится в тот момент, когда температура верхнего, прогретого слоя горючего материала снизится ниже температуры выхода горючих летучих фракций. Тогда горючая смесь в зоне горения над поверхностью горящего образца обеднится, интенсивность тепловыделения уменьшится, температура во фронте пламени снизится до температуры потухания и горение прекратится. При этом прекратится не только пламенное, гомогенное горение, но и гетерогенное, беспламенное горение ТГМ и поверхностного углеродного слоя.

Для определения требуемого количества воды на тушение ТГМ по механизму прекращения горения охлаждением составим баланс тепла на поверхности горящего материала  $Q_{\text{отв}}^{\text{в}} = \Sigma Q_{\text{отв}}^{\text{др}}$ . Количество, тепла, выделяющееся в прогретом слое и аккумулированное в поверхностном слое, можно подсчитать по уравнению:

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{ТГМ}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{пл}}$$

где  $Q_{\text{отв}}$  - общее количество тепла, которое следует отвести от ТГМ для прекращения процесса пламенного горения летучих над поверхностью образца и гетерогенного горения в прогретом слое;  $Q_{\text{ТГМ}}$  - количество тепла, запасенное в слое ТГМ, прогревом до температуры выше температуры выхода горючих;  $Q_{\text{пир}}$  - теплота экзотермических процессов пиролиза в указанном диапазоне температур за время тушения;  $Q_{\text{пл}}$  - количество тепла, поступающее к поверхности горючего материала от пламени из зоны горения за время тушения.

Для расчета количества воды, требуемой для тушения пожара ТГМ по механизму прекращения горения охлаждением, в качестве горючего материала примем древесину. Тогда за температуру выхода горючих летучих фракций примем условно температуру начала пиролиза древесины  $200^{\circ}\text{C}$ . Максимальную температуру на поверхности горящей древесины -  $700^{\circ}\text{C}$ . Толщина прогретого слоя древесины  $\delta_{\text{др}}$  до температуры выше

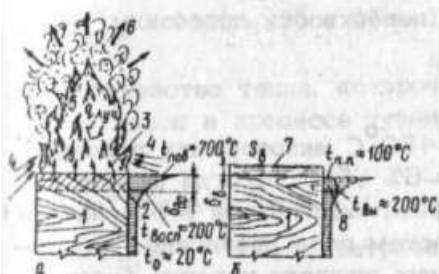


Рис. 8.9. Схема процесса горения (а) и тушения пламени (б) над горизонтальной поверхностью твердого горючего материала: 1 - твердый горючий материал (древесина); 2 - толщина слоя, прогретого выше температуры начала пиролиза ( $\delta_{др}$ ); 3 - выход "летучих" (смеси горючих газов); 4 - подсос воздуха в зону горения; 5 - факел пламени; 6 - продукты сгорания; 7 - условная толщина слоя воды, необходимой для тушения ( $\delta_{в}$ ); 8 - эпюра поля температур в древесине в момент тушения

200°С для термически толстых образцов составляет 1 см (рис. 8.9).

Предположим, что температура в прогретом слое древесины изменяется по линейному закону, от  $t_{др}^{max}$  на поверхности горения до  $t_{нач}^{пир}$  в глубине образца. Удельную плотность абсолютно сухой, частично пиролизованной древесины и ее теплоемкость определим по таблицам, соответственно равными:

$$\rho_{др} \approx 300 \text{ кг/м}^3; \quad c_{др} = 1,47 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{°С)}.$$

Тогда количество тепла, запасенное в древесине, которое следует отвести от нее для прекращения процессов горения, определим по выражению:

$$Q_{др} = m_{др} c_{др} \Delta t_{др} = V_{др} \rho_{др} c_{др} \frac{t_{др}^{max} - t_{нач}^{пир}}{2};$$

$$Q_{др} = S_{др} \delta_{др} \rho_{др} c_{др} \frac{t_{др}^{max} - t_{нач}^{пир}}{2}.$$

После подстановки численных значений входящих величин получим:

$$Q_{др} = S_{др} 0,01 \cdot 300 \cdot 1,47 \frac{700 - 200}{2} = 1100 S_{др}.$$

Или, в расчете на  $1 \text{ м}^2$  горячей поверхности древесины

$$Q_{\text{др}} \approx 1100 \text{ кДж/м}^2.$$

В диапазоне температур  $350-450^\circ\text{С}$  экзотермика пиролиза древесины составляет величину  $5-6\%$   $Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$ . Тогда наибольшее количество тепла, которое может выделиться в результате пиролизических процессов в прогретом слое древесины, за время ее тушения в расчете на единицу площади горения будет равно:

$$Q_{\text{пир}} = 0,5 m_1 0,06 Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} \tau,$$

где  $m_1$  - удельная массовая скорость выгорания древесины.

Допустим, что удельная массовая скорость пиролиза (в расчете на  $1 \text{ м}^2$  поверхности горения) равна массовой скорости выгорания древесины. А скорость выгорания за время тушения изменяется от своего наибольшего значения до нуля. Согласно многочисленным экспериментальным данным, удельная массовая скорость выгорания древесины на развитом пожаре  $m_1 \approx 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Как известно,  $Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$  древесины  $\sim 16800 \text{ кДж/кг}$ , тогда после подстановки численных значений входящих величин получим:

$$Q_{\text{пир}} = 0,5 \cdot 0,01 \cdot 0,06 \cdot 16800 \cdot 10 = 50.$$

Известно, что одиночный деревянный образец не горит с горизонтальной поверхности без внешнего дополнительного радиационного теплового потока. Экспериментально установлено, что количество тепла, поступающего от факела пламени к поверхности древесины, составляет величину  $6\%$   $Q_{\text{п}}$ , где

$$Q_{\text{п}} = \beta m_1 F_{\text{п}} Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}, \text{ т. е.}$$

$$Q_{\text{луч}} = 0,06 \beta m_1 S_{\text{др}2} Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} \tau = 0,06 \cdot 0,9 \cdot 0,01 \cdot 16800 \cdot 10 S_{\text{др}2} = 915 S_{\text{др}2}$$

или, в расчете на  $1 \text{ м}^2$  поверхности горения  $Q_{\text{луч}} = 91 (\text{кДж/м}^2)$ .

Тогда суммарное количество тепла, которое следует отнести от древесины, для ее тушения по механизму прекращения горения охлаждением  $Q_{\text{отв}} = Q_{\text{др}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{пл}}$  в расчете на  $1 \text{ м}^2$  поверхности горения будет равно:

$$Q_{\text{отв}} = 1100 + 50 + 91 \approx 1240 \text{ кДж/м}^2.$$

Количество тепла, которое будет отведено от горящего образца водой в процессе тушения, определим по формуле

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{н.в}} + Q_{\text{исп.в}},$$

где  $Q_{\text{н.в}}$  - тепло, затрачиваемое на нагревание воды до температуры кипения;  $Q_{\text{исп.в}}$  - тепло, затрачиваемое на испарение воды.

$$Q_{\text{н.в}} = m_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} = S_{\text{в}} \delta_{\text{в}} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}},$$

$$Q_{\text{исп.в}} = m_{\text{в}} r_{\text{в}} = S_{\text{в}} \delta_{\text{в}} \rho_{\text{в}} r_{\text{в}},$$

где  $r_{\text{в}}$  - скрытая теплота парообразования воды (2270 кДж/кг).

Для полного прекращения горения древесины должно выполняться условие  $Q_{\text{в}} < Q_{\text{отв}}$  и, подставив выражения для  $Q_{\text{н.в}}$  и  $Q_{\text{исп.в}}$ , получим:

$$Q_{\text{отв}} \leq S_{\text{в}} \delta_{\text{в}} \rho_{\text{в}} (c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} + r_{\text{в}}).$$

Учитывая, что согласно принятым ранее условиям, вода не стекает с горячей поверхности древесины и равномерным слоем лежит на ней, т.е. что  $S_{\text{в}} \approx S_{\text{др}}$ , сократим эти члены и решим последнее уравнение относительно  $\delta$ :

$$\delta_{\text{в}} \geq \frac{1240 \cdot 10^{-2}}{\rho_{\text{в}} (c_{\text{в}} \Delta t_{\text{в}} + r_{\text{в}})},$$

Приняв начальную температуру воды  $t_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$ , после подстановки получим:

$$\delta_{\text{в}} \geq \frac{1240 \cdot 10^{-2}}{2616} \approx \frac{12,4}{2616} \approx 0,00475 \text{ дм}$$

или окончательно:

$$\delta_{\text{в}} \approx 0,5 \text{ мм},$$

т.е. требуемая расчетная толщина слоя воды, необходимая для тушения древесины, равна 0,5 мм (рис. 8.9). А критический удельный расход воды будет равен:

$$q_{уд} = \frac{v_B}{S} = \frac{\delta_B \cdot S_B}{S_{др}} = \frac{\delta_B \cdot S_{др}}{S_{др}} = \frac{0,005 \cdot 100}{S} =$$

$$= 0,5 \text{ дм}^3/\text{м}^2$$

или

$$q_{уд} = 0,5 \text{ л}/\text{м}^2,$$

где  $S_{др}$  - площадь тушения, равная  $1 \text{ м}^2$ .

Однако столь малыми удельными расходами воды можно потушить пожар только при двух принятых ранее условиях: горящая поверхность расположена горизонтально; размеры поверхности относительно невелики.

На реальных пожарах древесина охлаждается не до температуры начала ее пиролиза, а до температуры воды, применяемой для тушения пожара. Это приводит к незначительному увеличению удельного расхода воды, до  $q_{уд}^B = 0,7 \text{ л}/\text{м}^2$ . Кроме того, вода подается до полного насыщения горючего материала водой. Это еще в 2-3 раза увеличивает удельный расход воды на тушение реального пожара, доводя  $q_{уд}^B$  до 2-2,5 л/м<sup>2</sup>. Но при этом резко возрастает надежность процесса тушения и исключается опасность повторного воспламенения. Наконец, на реальных пожарах удельный расход воды возрастает (в расчете на единицу площади пожара) пропорционально величине коэффициента поверхности горения  $K_{п}$ . Так как на реальных пожарах  $K_{п} = 1,5-2$ , то удельный расход воды на тушение пожара возрастает до 4-5 л/м<sup>2</sup>. Но тем не менее, с помощью этой величины можно рассчитать теоретически необходимый удельный расход воды на тушение реальных пожаров. Очевидно, что практический расход воды на тушение зависит от условий боевой обстановки, размеров площади пожара и ряда других осложняющих факторов. Но как показывает анализ статистических данных, величина удельного расхода воды на наиболее удачно потушенных пожарах вполне удовлетворительно описывается уравнением вида  $q_{уд}^B = f(F_{п})$ , которое для простейших пожаров в одноэтажных каменных зданиях I и II степени огнестойкости может быть записано в следующем виде:

$$q_{уд}^B = 0,5 F_{п},$$

где  $F_{п}$  - площадь пожара,  $\text{м}^2$ .

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДАЧИ ОГНЕТУШАЩИХ СРЕДСТВ

§ 9.1. Расчет удельных расходов, интенсивности подачи и общего количества огнетушащих средств для тушения пожаров

Для тушения пожаров необходимо правильно рассчитать общее количество того или иного вида огнетушащих средств, интенсивность их подачи и время тушения. Уметь рассчитывать эти параметры необходимо как при проектировании систем и средств автоматического пожаротушения, так и при организации боевой работы по тушению пожаров.

Рассмотрим каждый из этих параметров в отдельности и их взаимосвязь между собой.

Например, удельные расходы огнетушащих концентраций нейтральных газов и химически активных ингибиторов составляют:  $Ar \approx 54\%$ ,  $He \approx 37\%$ ,  $N_2 \approx 35\%$ ,  $CO_2 \approx 25\%$ ,  $C_2F_4Br_2 \approx 2\%$ ; воды на тушение газового пламени  $q_{уд}^B \approx 1-2 \text{ л/м}^3$ ; воды на прекращение горения пожаров ТГМ, например, древесины  $q_{уд}^B = 0,5 \text{ л/м}^2$  и др.

Это значит, что для полного прекращения процесса горения, например, метано-воздушной смеси, состава, близкого к стехиометрическому ( $10\% \text{ CH}_4 + 90\% \text{ воздуха}$ ), нужно подать:  $1,18 \text{ л}$  аргона,  $0,54 \text{ л}$  азота или гелия,  $0,33 \text{ л}$  двуокиси углерода или  $0,02 \text{ л}$  паров фреона на литр горючей метано-воздушной смеси, т.е. удельный расход газообразного огнетушащего средства — величина безразмерная  $\left( \frac{\text{литр огнетушащего средства}}{\text{литр горючей смеси}} \right)$ ,

которая соответственно равна для: аргона  $q_{Ar} = 1,18$ ; азота или гелия  $q_{уд}^{N_2, He} = 0,54$ ; двуокиси углерода  $q_{уд}^{CO_2} = 0,33$ ; а для паров тетрафтордибромэтана  $q_{уд}^{F_{114}Br} = 0,02$ .

Зная секундный расход горючей газовой смеси, можно вычислить требуемый секундный расход огнетушащего компонента (нейтрального газа или газообразного химически активного ингибитора). Требуемый секундный расход огнетушащего средства для тушения кинетического пламени газовой смеси определим по формуле

$$q_{0.c} = q_{г.c} q_{уд}^i$$

где  $q_{0.c}$  - требуемый секундный расход огнетушащего средства, л/с;  $q_{уд}^j$  - удельный расход огнетушащего средства.

В этом случае секундный расход огнетушащего средства совпадает с интенсивностью его подачи  $q_{0.c} \sim I_{0.c}$ . Требуемое количество огнетушащего средства для прекращения процесса горения рассчитаем по уравнению:

$$Q_{0.c} = I_{0.c} \tau_T \quad \text{или} \quad Q_{0.c} = q_{0.c} \tau_T,$$

где  $Q_{0.c}$  - требуемый объем инертного газа для тушения пожара (или газообразного ХАИ), л;  $\tau_T$  - время тушения, с.

Как известно, время тушения газообразных факелов пламени определяется газодинамическими условиями режима горения и принято условно равным 4-5 с. С учетом инженерного коэффициента запаса надежности  $k_3 = 2 \div 3$  окончательно получим требуемый объем газообразного огнетушащего средства, необходимый для прекращения пламенного горения газозоодушных смесей горючих газов:

$$Q_{0.c} = k_3 q_{0.c} \tau_T = (4 \div 9) q_{0.c}$$

или в общем виде:

$$Q_{0.c} = k_3 q_{г.c} q_{уд}^j \tau_T = (4 \div 9) q_{г.c} q_{уд}^j,$$

где величина множителя в скобках зависит от степени совершенства способа тушения, размеров факела пламени и др.

При диффузионном горении газов (паров горючих жидкостей) и подаче огнетушащих средств в факел пламени извне задача расчета требуемых расходов огнетушащих средств несколько сложнее. Потому что условия тушения факела пламени становятся менее однозначными. Коэффициент использования огнетушащих средств зависит от условий подачи огнетушащего средства, от массообмена с компонентами горючей смеси и зоной химических реакций горения, от размеров и формы факела пламени, от состояния окружающей атмосферы и других факторов.

Поэтому в формулу для расчета требуемого секундного расхода вводят коэффициент использования огнетушащего средства в процессе тушения  $K_{и}$ , равный отношению количества огнетушащего средства, фактически участвующего в механизме прекращения процессов горения в факеле пламени к общему количеству огнетушащего средства, поданного на тушение, численное значение которого заранее, как правило, неизвестно,



$$K_{и} = \frac{q_{о.с.}^{\phi}}{q_{о.с.}^{\Pi}} < 1.$$

Оно зависит от режима горения, размеров факела пламени и степени совершенства способов подачи огнетушащего средства в зону горения. Для каждого конкретного случая его следует определять отдельно\*. Тогда формула для расчета требуемого расхода огнетушащего средства примет вид:

$$q_{о.с.} = \frac{q_{г.с} q'_{уд}}{K_{и}}$$

Суммарный запас требуемого количества газообразного НГ или ХАИ для тушения диффузионного факела пламени будет равен

$$Q_{о.с.}' = \frac{Q_{о.с.}}{K_{и}}$$

или

$$Q_{о.с.} = \frac{k_3 q_{г.с} q'_{уд} r_{г}}{K_{и}}$$

При тушении факела пламени газового фонтана водой, подаваемой в зону горения, требуемый секундный расход воды определим по формуле:

$$q_{в} = \frac{q_{г.г} q_{уд}^в}{K_{и}},$$

где  $q_{в}$  - требуемый секундный расход воды для тушения факела пламени, л/с;  $q_{уд}^в$  - удельный расход воды на тушение факела пламени горючего газа, л/м<sup>3</sup>;  $K_{и}$  - коэффициент использования воды в процессе тушения;  $q_{г.г}$  - секундный расход горючего газа, м<sup>3</sup>/с.

Так, для метано-воздушной смеси без учета возможных потерь  $q_{уд}^в \approx 1$  л/м<sup>3</sup> и с учетом потерь  $q_{уд}^в \approx 2$  л/м<sup>3</sup> (т.е.  $K_{и}$  условно принято равным 0,5).

Тогда для тушения пожара газового фонтана природного га-

\* Численное значение коэффициента  $K_{и}$  может колебаться от 0,9 до 0,1 и ниже.

ва, состоящего преимущественно из метана, т.е. почти без конденсата и более тяжелых примесей теоретически необходимый секундный расход воды равен:

$$q_B = \frac{q_{г.г} q_{уд}^B}{K_{и}} = 2q_{г.г}.$$

Это значит, что для тушения пожара на газовом фонтане средней мощности 3 млн.м<sup>3</sup>/сутки, т.е. 35 м<sup>3</sup>/с, требуемый секундный расход воды будет равен:  $q_B = 2 \cdot 35 = 70$  л/с. Это примерно в 3-4 раза меньше, чем фактически подаваемый секундный расход воды при тушении пожаров на газовых фонтанах с таким дебитом.

Если примем время тушения факела пламени  $t_T = 4 \div 5$  с. Тогда суммарный запас воды, необходимый для тушения факела пламени газового фонтана будет равен:

$$Q_B = q_B t_T = \frac{q_{г.г} q_{уд}^B t_T}{K_{и}} = \frac{q_{г.г} 1 \cdot 5}{0,5} = 10q_{г.г}.$$

С учетом инженерного коэффициента запаса,  $k_3 = 2 \div 3$ , получим:

$$Q'_B = \frac{k_3 q_{г.г} q_{уд}^B t_T}{K_{и}} = k_3 Q_B \approx 30q_{г.г}.$$

Для принятого газового фонтана с дебитом 3 млн.м<sup>3</sup>/сутки это означает:

$$Q'_B = 30 \cdot 35 = 1000 \text{ л},$$

т.е. примерно 1 кубометр воды. \*

На реальных пожарах время тушения факела пламени колеблется от полутора до двух минут. Поэтому и расходы воды на прекращение горения факела пламени получаются в 10-20 раз

\* При этом необходимо иметь в виду, что необходимый запас воды рассчитывали только на процесс прекращения пламенного горения газового фонтана, без учета расходов воды на охлаждение оборудования, территории, для подготовки атаки на фонтан, на защиту личного состава, соседних объектов и т.д., а также на предотвращение повторного воспламенения фонтана в процессе монтажа запорной арматуры и т.п.

выше расчетных (т.е.  $K_{II}$  на реальных пожарах равен  $0,05 \pm 0,025$ ).

Это показывает, какие большие резервы повышения эффективности и качества тушения пожаров на газовых и газонефтяных фонтанах скрыты в повышении коэффициента использования воды, за счет совершенствования и оптимизации способов ее подачи в зону горения.

§ 9.2. Расчет интенсивности подачи, времени тушения и общего количества огнетушащих средств при тушении негорючими газами и химически активными ингибиторами

Нейтральные газы и химически активные ингибиторы находят широкое применение при тушении открытых пожаров и пожаров в помещениях. К их числу относятся пожары, связанные с горением бензина, нефти, лаков и красок, электроустановок и трансформаторов, машинных отделений судов, библиотек, вычислительных центров, силовых установок самолетов и др. Получены положительные результаты и по применению ХАИ при тушении пожаров газовых фонтанов на буровых скважинах.

Наибольшее применение НГ и ХАИ нашли в автоматических стационарных установках пожаротушения, обеспечивающих объемное тушение пожара в защищаемых помещениях. Стационарными установками пожаротушения с использованием НГ и ХАИ рекомендуется оборудовать помещения объемом до  $6000 \text{ м}^3$ . Эффективность тушения пожара в значительной степени зависит от физико-химических свойств огнетушащего средства и способов его подачи в защищаемый объем, конструктивных элементов защищаемого помещения, кратности газообмена в помещении и др.

При расчете параметров тушения пожара с помощью НГ (ХАИ), как правило, решаются две задачи: по известному допустимому времени тушения определяют требуемый расход огнетушащего средства либо, наоборот, по известному расходу НГ (ХАИ) определяют время тушения пожара, т.е. время создания огнетушащей концентрации в защищаемом объеме.

При создании систем пожаротушения известными параметрами являются следующие:

$V_{п}$  - объем помещения,  $\text{м}^3$ ;

$a_{д}$  - минимальная огнетушащая концентрация НГ (ХАИ) в объемных долях;

$t_{т}$  - допустимое время тушения пожара, с.

Определим требуемую интенсивность подачи НГ (ХАИ), точнее, его секундный расход  $q_{0,с}$ , обеспечивающий тушение пожара в заданное время  $t_T$ . Если предположим, что при подаче НГ (ХАИ) в объем помещения утечки НГ (ХАИ) отсутствуют, то объем нейтрального газа, необходимый для тушения пожара будет равен:

$$V_{н.г} = V_{п} \alpha_{л} \quad (9.1)$$

Так как допустимое время тушения пожара  $t_T$  задано, то требуемый секундный расход нейтрального газа (ХАИ) будет равен:

$$q_{0,с} = \frac{V_{н.г}}{t_T} \quad (9.2)$$

или

$$q_{0,с} = \frac{V_{п} \alpha_{л}}{t_T}$$

При решении обратной задачи по заданному секунднему расходу огнетушащего средства определим время тушения пожара в помещении:

$$t_T = \frac{V_{п} \alpha_{л}}{q_{0,с}} \quad (9.3)$$

Количество НГ (ХАИ), необходимое для тушения пожара, соответственно равно:

$$G_{н.г} = V_{н.г} \rho_{н.г} \quad \text{или} \quad G_{н.г} = V_{п} \alpha_{л} \rho_{н.г} \quad (9.4)$$

Однако этот упрощенный расчет не учитывает многих физических явлений, происходящих при тушении пожара нейтральными газами и химически активными ингибиторами, например, таких, как неравномерность смешения НГ или ХАИ с воздухом в защищаемом помещении, неизбежность утечек подаваемого газа и др. На реальных пожарах практически невозможно осуществить подачу НГ в помещение без его утечки. Поэтому уточним расчет с учетом утечек нейтрального газа из объема помещения через неплотности или проемы. Предположим, что при

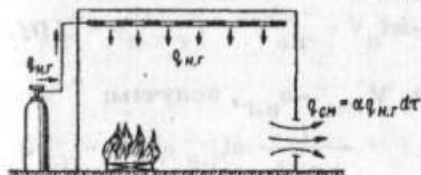


Рис. 9.1. Схема расчета потребных количеств НГ и ХАИ при объемном тушении

подаче нейтрального газа в помещение (рис. 9.1) давление в нем практически не повышается (равно атмосферному) и что нейтральный газ мгновенно и равномерно перемешивается в объеме помещения с содержащимся там воздухом. Секундный расход газовой смеси  $q_{см}$ , вытесняемой из помещения, в состав которой входит воздух и  $\alpha_i$  НГ будет равен секунднему расходу нейтрального газа  $q_{н.г.}$ :  $q_{см} = q_{н.г.}$ . Тогда уравнение, описывающее количество нейтрального газа, добавляемого в помещение в любой момент времени при тушении пожара, будет иметь следующий вид:

$$\Delta q_{н.г.} = q_{н.г.} - q_{н.г.}^{выт}, \quad (9.5)$$

где  $q_{н.г.}^{выт}$  — секундный расход нейтрального газа, вытекающего из помещения вместе с воздухом. Он пропорционален текущему значению концентрации НГ в газовой смеси  $\alpha_i$ , находящейся в помещении и вытесняемой из него с расходом  $q_{см}$ , л/с;  $\alpha_i$  — концентрация нейтрального газа в помещении в любой рассматриваемый момент времени.

Тогда

$$q_{н.г.}^{выт} = \alpha_i q_{см}, \quad (9.6)$$

где  $q_{см}$  — объем газовой смеси, вытесняемой из помещения в единицу времени.

Количество нейтрального газа  $\Delta q_{н.г.}$  ведет к повышению концентрации НГ в помещении вплоть до гасящих концентраций  $\alpha_d$ . Тогда изменение концентрации нейтрального газа в помещении по времени  $\frac{d\alpha}{dt}$  можно записать в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\Delta q_{н.г.}}{V_{п}} = \frac{q_{н.г.} - q_{н.г.}^{выт}}{V_{п}}$$

или

$$\frac{da}{dr} = \frac{1}{V_{\Pi}} (q_{\text{н.г}} - aV_{\text{см}}). \quad (9.7)$$

Учитывая, что количественно  $V_{\text{см}} = q_{\text{н.г}}$ , получим:

$$\frac{da}{dr} = \frac{1}{V_{\Pi}} (q_{\text{н.г}} - a q_{\text{н.г}}) \quad (9.8)$$

или

$$\frac{da}{dr} = \frac{q_{\text{н.г}}}{V_{\Pi}} (1 - a). \quad (9.9)$$

Произведя разделение переменных, получим:

$$\frac{da}{1-a} = \frac{q_{\text{н.г}}}{V_{\Pi}} dr, \quad (9.10)$$

принтегрировав его по  $a$  от  $a = 0$  в начале подачи НГ до  $a = a_1$  в момент тушения, получим:

$$r_{\text{T}} = \frac{V_{\Pi}}{q_{\text{н.г}}} \ln \frac{1}{1-a_1}. \quad (9.11)$$

Это уравнение позволяет рассчитать время достижения огнетушащей концентрации в помещении, т.е. время тушения пожара  $r_{\text{T}}$  в зависимости от секундного расхода огнетушащего газа  $q_{\text{н.г}}$ , численного значения его огнетушащей концентрации  $a_1$  и объема помещения, с учетом утечки НГ из помещения, в процессе его подачи.

Произведя потенцирование уравнения (9.11) и решая его относительно  $a$ , получим закон изменения концентрации НГ в газовой среде помещения в процессе тушения пожара:

$$a = 1 - e^{-\frac{q_{\text{н.г}}}{V_{\Pi}} r}, \quad (9.12)$$

которая зависит от времени  $r$ , секундного расхода НГ  $q_{\text{н.г}}$  и объема помещения  $V_{\Pi}$ .

Определив из уравнения (9.11) время тушения  $r_{\text{T}}$ , можем рассчитать требуемый запас НГ, необходимый для тушения пожара в данном помещении:

$$V_{н.г} = q_{н.г} r_T, \quad V_{н.г} = V_{п} \ln \frac{1}{1 - \alpha_{л}} \quad (9.13)$$

$$G_{н.г} = V_{п} \rho_{н.г} \ln \frac{1}{1 - \alpha_{л}}, \quad (9.14)$$

Однако и этот расчет требует уточнения, так как практически очень трудно добиться равномерности распределения огнетушащего средства по объему помещения. Поэтому в расчетную формулу вводятся дополнительно поправочные коэффициенты:

$$G_{н.г} = k_1 k_3 V_{п} \ln \frac{1}{1 - \alpha_{л}} \rho_{н.г}, \quad (9.15)$$

где  $k_1$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения огнетушащего средства по объему помещения ( $k_1 > 1$ );  $k_3$  - коэффициент запаса ( $k_3 > 1$ ).

При определении количества ХАИ, находящихся в нормальных условиях в жидком состоянии, в расчетную формулу дополнительно вводят коэффициент  $k_2$ , учитывающий неполноту испарения ХАИ при подаче его в объем помещения  $k_2 < 1$ . Коэффициент  $k_2$  определяется физико-химическими свойствами ХАИ и условиями подачи в защищаемый объем (температурой кипения, теплотой испарения, давлением подачи ХАИ и др.):

$$G_{ХАИ} = \frac{k_1 k_3}{k_2} V_{п} \ln \frac{1}{1 - \alpha_{л}} \rho_{ХАИ}. \quad (9.16)$$

Для снижения металлоемкости автоматических систем пожаротушения и количества огнетушащего средства в настоящее время все большее распространение находят системы объемно-локального пожаротушения. В этом случае внутренний объем помещения в зависимости от пожароопасных участков разбивается условно на несколько частей. Количество огнетушащего средства принимается пропорциональным объему наибольшего из защищаемых участков.

Количество огнетушителей в системе пожаротушения рассчитывается по формуле

$$n_{огн} = \frac{G_{н.г}}{V \rho_{н.г} k_v}, \quad (9.17)$$

где  $V$  - объем огнетушителя,  $\text{м}^3$ ;  $k_v$  - объемный коэффициент наполнения огнетушителя (НГ или ХАИ).

Под объемным коэффициентом наполнения средства в огнетушителе к объему огнетушителя. Коэффициент  $k_v = \frac{V_{\text{ж}}}{V_{\text{б}}}$  определяется физико-химическими свойствами огнетушащего средства и эксплуатационным диапазоном температур автоматической системы пожаротушения.

### § 9.3. Расчет времени тушения и требуемой интенсивности подачи пены при тушении пожаров ЛВЖ, ГЖ

Для тушения пожаров пену подают двумя способами: на поверхность горючего материала и объемным способом.

1. Для изолирования зоны горения от поверхности ГЖ пену подают на границу их раздела. Тушение в этом случае называется тушением по поверхности. Так тушат горючие жидкости в резервуарах, разлитые горючие жидкости, пожары древесины на складах. При тушении по поверхности применяют низкократные и среднекратные пены, обладающие охлаждающими и изолирующими свойствами.

Определим время тушения и интенсивность подачи пены на поверхность ГЖ. Предположим, что пена подается равномерно по всей поверхности ГЖ слоем одинаковой толщины и при этом пена не разрушается. Тогда для тушения пожара необходимо нанести на поверхность ГЖ объем пены:

$$V_{\text{п}}^{\text{необ}} = F_{\text{п}} H_{\text{мин}} ;$$

где  $F_{\text{п}}$  - площадь пожара,  $\text{м}^2$  (величина известная);  $H_{\text{мин}}$  - минимальный слой пены, обеспечивающий тушение пожара, м (рассчитывается по формуле или известна из предшествующих экспериментов).

Объем поданной пены можно рассчитать по выражению:

$$V_{\text{п}}^{\text{под}} = q_{\text{ж}} K_{\text{п}} r_{\text{т}} ;$$

где  $q_{\text{ж}} = I_{\text{п}} F_{\text{п}}$  - расход пенообразующего раствора, л/с;  $K_{\text{п}}$  - кратность пены;  $r_{\text{т}}$  - время тушения пожара, с.

Условием тушения пожара является:



$$V_{\text{п}}^{\text{под}} \geq V_{\text{п}}^{\text{необ}}$$

Тогда, подставив выражения для  $V_{\text{п}}^{\text{под}}$  и  $V_{\text{п}}^{\text{необ}}$ , получим:

$$r_{\text{T}} = \frac{V_{\text{п}}}{q_{\text{ж}} K_{\text{п}}} = \frac{F_{\text{п}} H_{\text{min}}}{q_{\text{ж}} K_{\text{п}}} = \frac{F_{\text{п}} H_{\text{min}}}{I_{\text{п}} F_{\text{п}} K_{\text{п}}} = \frac{H_{\text{min}}}{I_{\text{п}} K_{\text{п}}}$$

Величины  $H_{\text{min}}$  и  $K_{\text{п}}$  можно определить расчетно, либо экспериментально, либо они известны. Таким образом, для принятого случая получена зависимость  $r_{\text{T}} = f(I_{\text{п}})$ .

Аналогично задачу можно решить с учетом разрушения пены. Так как процесс разрушения пены будет идти непрерывно с момента начала подачи пены на тушение, то накопление слоя пены (зависящее от интенсивности ее подачи и разрушения) следует рассматривать во времени. Объем пены, поданной на поверхность ГЖ за время  $dr$  равен:

$$dV_{\text{п}}^{\text{под}} = q_{\text{ж}} K_{\text{п}} dr \quad (9.18)$$

Количество разрушившейся пены, за время ее подачи, выражается через интенсивность разрушения пены

$$I_{\text{разр}} = \frac{\Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}}}{V_{\text{п}}} \frac{1}{\Delta r} = \frac{1}{S_{\text{п}}}$$

Тогда объем разрушившейся пены за то же время:

$$dV_{\text{п}}^{\text{разр}} = \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} dr \quad (9.19)$$

Здесь  $S_{\text{п}}$  - стойкость пены;

$$S_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{\Delta V_{\text{п}}^{\text{разр}}} \Delta r$$

Количество накапливающейся пены на поверхности горючей жидкости определяется разностью подаваемого и разрушившегося объемов пены, т.е.

$$dV_{\text{п}}^{\text{нак}} = dV_{\text{п}}^{\text{под}} - dV_{\text{п}}^{\text{разр}} = (q_{\text{ж}} K_{\text{п}} - \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{п}}}) dr \quad (9.20)$$

После интегрирования этого уравнения по  $V_{\Pi}$  <sup>нак</sup> от 0 до  $V_{\Pi}$ , а по  $r$  от 0 до  $r_T$  получим:

$$V_{\Pi} = q_{ж} K_{\Pi} S_{\Pi} \left( 1 - e^{-\frac{r_T}{S_{\Pi}}} \right). \quad (9.21)$$

После преобразования:

$$r_T = S_{\Pi} \ln \frac{1}{1 - \frac{V_{\Pi}}{q_{ж} K_{\Pi} S_{\Pi}}},$$

так как  $V_{\Pi} = F_{\Pi} H_{\min}$ , а  $q_{ж} = F_{\Pi} I_{\Pi}$ , то с учетом этого:

$$r_T = S_{\Pi} \ln \frac{1}{1 - \frac{F_{\Pi} H_{\min}}{F_{\Pi} I_{\Pi} K_{\Pi} S_{\Pi}}} = S_{\Pi} \ln \frac{1}{1 - \frac{H_{\min}}{I_{\Pi} K_{\Pi} S_{\Pi}}}. \quad (9.22)$$

Поскольку  $H_{\min}$ ,  $S_{\Pi}$  и  $K_{\Pi}$  для данного вида пены и горючей жидкости являются величинами известными и относительно постоянными, обозначим:  $\frac{H_{\min}}{S_{\Pi} K_{\Pi}} = b$ , тогда  $r_T = S_{\Pi} \ln \frac{1}{1 - \frac{b}{I}}$ .

Анализ полученной зависимости показывает, что

$$\begin{aligned} \text{при } I_{\Pi} \rightarrow \infty \quad r_T &\rightarrow 0, \\ \text{при } I_{\Pi} \rightarrow b \quad r_T &\rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Таким образом, величину  $I_{\Pi} = b$  можно назвать критической интенсивностью подачи пены:

$$I_{кр} = \frac{H_{\min}}{K_{\Pi} S_{\Pi}}. \quad (9.23)$$

На графике (рис. 9.2) показана зависимость  $r_T = f(I_{\Pi})$ . Оптимальная интенсивность подачи пены условно определяется по соотношению

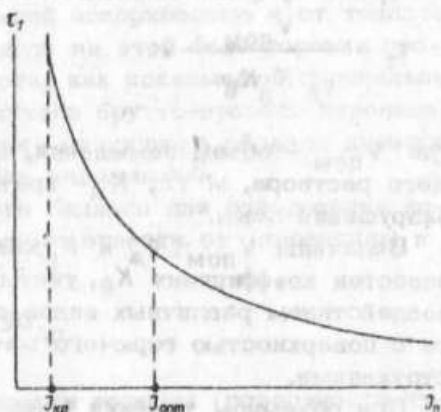
$$I_{опт} = 2,3 I_{кр}. \quad (9.24)$$

Для каждого пенообразователя и вида горючей жидкости существует оптимальная интенсивность подачи пены. В табл. 9.1

Рис. 9.2. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи пены

приведены оптимальные интенсивности подачи пены для различных видов ЛВЖ и ГЖ. Эти интенсивности можно применять при тушении нефтепродуктов в резервуаре при подаче пены сливом или струями.

При других условиях тушения интенсивности подачи пены и ее кратность могут отличаться от приведенных в табл. 9.1.



2. Второй способ тушения пеной - объемный. При этом способе тушения пеной заполняется весь объем зоны горения или его часть. Таким способом тушат пожары в подвалах и тоннелях, пожары в машинных отделениях судов, шахтах и т.п.

Таблица 9.1

Горючая жидкость	Интенсивность подачи раствора, л/(м <sup>2</sup> ·с)		
	ВМП низкой кратности (K=6). Подача струями или сливом	ВМП средней кратности (K=100)	Химическая пена (K = 5)
Нефтепродукты ( $t_{всп} < 28^{\circ}\text{C}$ )	0,12	0,08	0,15
Нефтепродукты ( $t_{всп} > 28^{\circ}\text{C}$ )	0,15	0,05	0,10
Нефти	0,12	0,05	0,15
Мазуты и масла	0,1	0,05	0,06
Этиловый спирт и ацетон	-	0,3	0,6
Диэтиловый спирт	-	-	0,16
Расчетное время подачи раствора, мин	10	10	25

Время тушения объемным способом определим по формуле

$$t_T = \frac{V_{\text{пом}}}{q_{\text{ж}} K_{\text{п}} K_0},$$

где  $V_{\text{пом}}$  - объем помещения, м<sup>3</sup>;  $q_{\text{ж}}$  - расход пенообразующего раствора, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\text{п}}$  - кратность пены;  $K_0$  - коэффициент разрушения пены.

Величины  $V_{\text{пом}}$ ,  $q_{\text{ж}}$  и  $K_{\text{п}}$  как правило, известны. Чаще неизвестен коэффициент  $K_0$ , учитывающий разрушение пены под воздействием различных видов тепловых потоков, и от контакта с поверхностью горючего материала и ограждающими конструкциями.

При объемном тушении чаще всего применяют высокократную пену. Малый удельный вес и достаточно высокий коэффициент динамической вязкости этой пены при тушении внутренних пожаров создают два рода трудностей. Во-первых, пену трудно подать на значительное расстояние, так как при горении в закрытых помещениях создается подпор дымовых газов, препятствующих продвижению пены; во-вторых, высокократная пена особо чувствительная к воздействию высокотемпературных конвективных токов, которые интенсивно ее разрушают. Требуемые интенсивности подачи пены определяются для конкретных видов объектов пожара, как правило, экспериментальным путем.

#### § 9.4. Расчет требуемой интенсивности подачи, удельных расходов воды и времени тушения пожаров ТГМ

Определение требуемой интенсивности подачи воды и зависимости времени тушения пожара и удельных расходов воды от интенсивности ее подачи при тушении пожаров ТГМ является одной из актуальных задач пожарной охраны. Она учитывается при разработке автоматических средств пожаротушения и при разработке оперативных планов пожаротушения.

Для расчета этих параметров тушения предположим, что площадь поверхности горения равна площади пожара ( $K_{\text{п}}=1$ ) и равна площади тушения, т.е. что процесс тушения осуществляется одновременно по всей площади пожара. Тогда интенсивность подачи огнетушащего средства, действующего по механизму горения охлаждением поверхности горючего материала, должна быть такой, чтобы интенсивность охлаждения древесины была выше интенсивности ее прогрева под воздействием внешних и внут-

ренных источников тепла, т.е. тепла поступающего от факела пламени, из зоны горения над этой поверхностью и от теплоты пиролиза горючего материала, если на этой фазе горения процесс пиролиза экзотермичен. Хотя, как показывают специальные исследования, в большинстве случаев брутто-процесс пиролиза древесины эндотермичен и горение единичного образца древесины без внешнего источника тепла невозможно.

Составим уравнение теплового баланса для определения количества тепла, которое необходимо отвести от древесины в процессе ее тушения:

$$Q_{\text{отв}} = q_{\text{пл}} S r_T + q_{\text{пир}} S r_T + S Q_{\text{др}}$$

или, в расчете на  $1 \text{ м}^2$  поверхности горения (поверхности тушения):

$$Q_{\text{отв}} = r_T (q_{\text{пл}} + q_{\text{пир}}) + Q_{\text{др}}$$

То есть количество тепла, которое следует отвести от древесины, пропорционально времени тушения и интенсивности тепловых потоков, а также количеству тепла, запасенному в прогретом слое древесины, значит, чем дольше будем тушить, тем большее количество тепла потребуется отвести. И наоборот, чем меньше время тушения, тем меньшее количество тепла необходимо отвести от горючего материала. При  $r \rightarrow 0$  количество тепла, которое следовало бы отвести от древесины, было бы минимальным, равным  $Q_{\text{др}}$ , т.е. тому количеству, которое запасено в прогретом слое древесины в процессе горения. Но в связи с тем, что тепло отводится с поверхности прогретого слоя, а этот слой обладает определенным термическим сопротивлением ( $1/\lambda_{\text{др}}$ ), минимальное время охлаждения, полученное расчетно-аналитическим путем и проверенное экспериментально, составляет 15-20 с. Такое время охлаждения прогретого слоя древесины получается, если горящий образец древесины сбросить в резервуар с водой, т.е. при времени подачи воды, стремящемся к нулю,  $r_{\text{под}} \rightarrow 0$ , а интенсивности подачи воды, соответственно стремящейся к бесконечности,  $I_{\text{под}} \rightarrow \infty$ .

Таким образом, время тушения древесины путем охлаждения ее с поверхности горения складывается как бы из двух составляющих: времени подачи воды  $r_{\text{под}}$  и минимального времени охлаждения древесины  $r_{\text{охл}}^{\text{min}}$ , т.е.

$$r_T = r_{\text{под}} + r_{\text{охл}}^{\text{min}}$$

При  $r_{\text{под}} \gg r_{\text{охл}}^{\text{min}}$  минимальным временем охлаждения можно пренебречь и считать, что  $r_T \approx r_{\text{под}}$ . При  $r_{\text{под}} \ll r_{\text{охл}}^{\text{min}}$  можно пренебречь временем подачи воды и считать, что  $r_T \approx r_{\text{охл}}^{\text{min}}$ . Обычно эти времена соизмеримы,  $r_{\text{под}} \approx r_{\text{охл}}^{\text{min}}$ . Общее количество воды, поданное в процессе тушения древесины, равно произведению ее секундного расхода на время подачи  $V_{\text{общ}} = q_V r_{\text{под}}$ , а количество тепла, которое она способна отвести от горячего материала в процессе тушения, равно произведению количества поданной воды на удельный тепловой эффект ее испарения  $Q_{\text{уд}}^B = m(c_V \Delta t_V + r_V)$ , который равен  $Q_{\text{уд}}^B = 2600 \text{ кДж/кг}$ . Тогда суммарное количество тепла, отведенное от поверхности древесины в процессе тушения, будет равно:

$$Q_{\text{отв}} = V_{\text{общ}} \rho_V Q_{\text{уд}}^B = q_V r_{\text{под}} \rho_V Q_{\text{уд}}^B \approx 2600 q_V r_{\text{под}}$$

Или, учитывая, что секундный расход воды  $q_V = IF$ , т.е. равен интенсивности подачи, помноженной на площадь тушения и что площадь тушения принята равной  $1 \text{ м}^2$ , получим:

$$Q_{\text{отв}} = 2600 I r_{\text{под}}$$

Под  $r_{\text{под}}$  здесь понимается физическое время подачи воды на горящую поверхность.

Приравняем это выражение к тому количеству тепла, которое следовало отвести от древесины для ее тушения:

$$2600 I r_{\text{под}} = r_T (q_{\text{пл}} + q_{\text{пир}}) + Q_{\text{др}}$$

Подставив сюда известные из гл. 8 численные значения

$$(q_{\text{пл}} + q_{\text{пир}}) = (0,06 + 0,06) Q_{\text{п}} = 0,12 \beta_V \rho_M Q_{\text{н}}^B \approx 1,85 \text{ кДж/м}^2$$

и

$$Q_{\text{др}} = 1050 \text{ кДж/м}^2,$$

получим:

$$2600 I r_{\text{под}} = 18,5 r_T + 1050$$

или окончательно:

$$l r_{\text{под}} = 7 \cdot 10^{-3} r_T + 0,4.$$

Коэффициент  $7 \cdot 10^{-3}$  в правой части этого уравнения соответствует той интенсивности подачи воды, которая необходима для отвода тепла, поступающего к поверхности древесины в процессе тушения от пламени (зоны горения)  $q_{\text{пл}}$  и изнутри прогретого слоя в случае, если тепловой эффект пиролиза древесины положителен  $q_{\text{пир}}$ . Обозначим эту интенсивность подачи через  $l_0$ . Тогда это уравнение запишется в следующем виде:

$$l r_{\text{под}} = l_0 r_T + 0,4.$$

Заметим, что произведение  $l r$  и по размерности и по физическому смыслу есть ни что иное, как удельный расход воды  $l r_{\text{под}} = q_{\text{уд}}^{\text{в}}$ , поданной на тушение древесины;

$l_0 r_T = q_{\text{уд}}^{\text{комн}}$  - удельный расход воды на компенсацию тепловых потоков от факела пламени и в процессе пиролиза, а  $0,4 \text{ л/м}^2$  есть удельный расход воды на охлаждение прогретого слоя древесины

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{Q_{\text{др}}}{Q_{\text{уд}}^{\text{в}}} = \frac{1050}{2600} = 0,4 \text{ л/м}^2,$$

т.е. уравнение теплового баланса в процессе тушения теперь можно записать в виде:

$$q_{\text{уд}}^{\text{в}} = q_{\text{уд}}^{\text{комн}} + q_{\text{уд}}^0$$

или, выраженное через интенсивность подачи воды время ее подачи и время тушения вновь получим:

$$l r_{\text{под}} = l_0 r_T + q_{\text{уд}}^0.$$

Независимым переменным здесь является интенсивность подачи воды, которая определяется тем расходом воды, который может быть подан в процессе тушения, и той площадью, на которую этот расход подается:

$$l = \frac{q_{\text{в}}}{F_T},$$

а время тушения  $\tau_T$  есть функция этой интенсивности подачи. Учитывая, что, согласно изложенному выше,  $\tau_T = \tau_{\text{под}} + \tau_{\text{охл}}^{\text{min}}$  или

$$\tau_T = \tau_{\text{под}} + \tau_0, \quad \text{где } \tau_0 = \tau_{\text{охл}}^{\text{min}} = 15 \div 20 \text{ с}$$

запишем уравнение удельных расходов воды в следующем виде:

$$l \tau_{\text{под}} = l_0 (\tau_{\text{под}} + \tau_0) + q_{\text{уд}}^0; \quad l \tau_{\text{под}} - l_0 \tau_{\text{под}} - l_0 \tau_0 = q_{\text{уд}}^0;$$

$$\tau_{\text{под}} (l - l_0) = q_{\text{уд}}^0 + l_0 \tau_0.$$

Решая его относительно времени подачи воды, получим:

$$\tau_{\text{под}} = \frac{q_{\text{уд}}^0 + l_0 \tau_0}{l - l_0}.$$

Проанализируем это уравнение: величины  $q_{\text{уд}}^0$ ,  $l_0$  и  $\tau_0$  относительно постоянные, они равны соответственно  $0,4 \text{ л/м}^2$ ;  $10^{-3} \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ,  $15 \div 20 \text{ с}$ , переменная величина -  $l \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . При  $l \rightarrow l_0$  требуемое время подачи стремится к бесконечности (вся подаваемая вода идет на компенсацию внешних и внутренних тепловых потоков к поверхности горения, запасенное в древесине тепло не отводится, процессе пиролиза, выход летучих в зону горения и горение продолжают). Через некоторое время этот запас тепла израсходуется за счет теплоотвода вглубь материала, температура прогретого слоя понизится, пиролиз прекратится и тем самым прекратится выход летучих в зону горения, а следовательно, прекратится и сам процесс горения. Но это крайний случай. Согласно принятой схеме расчета, запасенное в древесине тепло следует отвести от нее подаваемой на ее поверхность водой.

Если  $l \rightarrow \infty$ ,  $\tau_{\text{под}} \rightarrow 0$ , т.е. при бесконечно большой интенсивности подачи воды требуемое время ее подачи стремится к нулю, а время тушения  $\tau_T$  - согласно физическому смыслу и уравнению  $\tau_T = \tau_{\text{под}} + \tau_0 = \tau_{\text{под}} + \tau_{\text{охл}}^{\text{min}}$  - стремится к минимально необходимому времени охлаждения прогретого слоя древесины, т.е. составляет величину  $15 \div 20 \text{ с}$ . График зависимости времени тушения древесины от интенсивности подачи воды (рис. 9.3), соответствует уравнению

$$\tau_T = \frac{q_{\text{уд}}^0 + l_0 \tau_0}{l - l_0}.$$



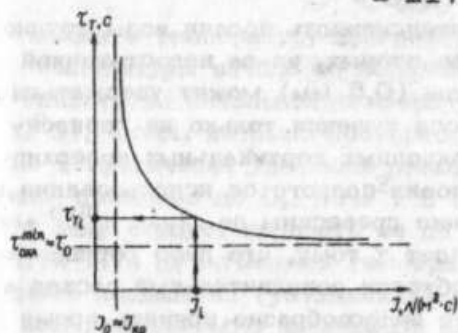


Рис. 9.3. Зависимость времени тушения древесины от интенсивности подачи воды

Это гипербола с двумя асимптотами:  $l = l_0$  и

$$\tau_T = \tau_0 = \tau_{охл}^{min}$$

Из графика и формулы  $q_{уд} = l r_{под}$  видно, что удельный расход воды на тушение древесины тоже есть функция интенсивности подачи воды и времени ее подачи и минимальным он является при времени подачи воды 1 с и максимальной интенсивности подачи  $0,4 \div 0,5 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . В этом случае  $q_{уд} = 0,4 - 0,5 \text{ л}/\text{м}^2$ , как и было получено ранее, в гл. 8.

С уменьшением интенсивности подачи требуемый удельный расход воды несколько возрастает и при очень малых интенсивностях  $0,014 \div 0,015 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  достигает величины  $1,1 \div 1,2 \text{ л}/\text{м}^2$ , а затем еще более круто возрастает, уходя в бесконечность при  $l \rightarrow 0,007 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . При этом необходимо помнить, что речь идет о минимальном, теоретически необходимом удельном расходе воды, требуемом для тушения древесины, т.е. подавать воду с указанными выше интенсивностями следует лишь в течение времени  $\tau_{под}$  соответствующего данной интенсивности подачи, по формуле  $\tau_{под} = f(l)$  или по графику (рис. 9.3).

Если искусственно затягивать подачу воды с заданной интенсивностью и подавать ее дольше указанного времени, удельный расход воды на тушение, естественно, резко возрастает, но это уже будет не требуемый, расчетный удельный расход воды на тушение, а тот фактический удельный расход, который реализуется на практике. Особый интерес представляет вопрос об оптимальной интенсивности подачи воды на тушение. Если за параметр оптимизации принять минимальный удельный расход воды и минимальное время тушения, то интенсивность подачи воды должна быть максимальной,  $0,4 \div 0,45 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ; Но,

во-первых, такую большую интенсивность подачи воды трудно осуществить на практике, а во-вторых, из-за недостаточной вязкости воды такой слой воды (0,5 мм) может удержаться в течение первых секунд процесса тушения только на горизонтальных поверхностях, а с наклонных вертикальных поверхностей вода будет стекать и условия полного ее использования на механизм тушения - охлаждение древесины до  $t_{др} < t_{нач}^{пир}$  - не будет реализовано. Это приведет к тому, что либо горение не будет прекращено, либо потребуются дополнительный расход воды на процесс тушения. Более целесообразно принять время подачи воды соизмеримым с минимальным временем тушения  $\tau_{под} \tau_{охл}^{min} = \tau_0 = 20$  с, так как при подаче всей необходимой на тушение воды за 1 с ( $\tau_{под} = 1$  с) время охлаждения древесины будет  $15 \div 20$  с, а время тушения -  $16 \div 21$  с. Приняв  $\tau_{под}^{opt} = 20$  с, получим численное значение интенсивности подачи по формуле

$$I_{opt} = \frac{q_{уд}^{гр}}{\tau_{под}^{opt}} = \frac{0,68}{20} = 0,034 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Следует отметить, что это значение хорошо совпадает с нормативными рекомендациями по тушению ТГМ типа древесины. Учитывая, что на практике коэффициент поверхности горения на реальных пожарах лежит в пределах  $2 \div 2,5$ , получим расчетно-необходимую оптимальную интенсивность подачи воды по формуле

$$I_{opt}^{прак} = K_{п} I_{opt} = (2 \div 2,5) 0,034 = 0,07 \div 0,095.$$

Рекомендуемая в пожарно-технической литературе нормативная интенсивность подачи воды для этого случая  $I_{н} = 0,08 \div 0,1 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , что вполне удовлетворительно согласуется с полученным значением  $I_{opt} = 0,07 - 0,095 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . При этом расчетное время тушения 40 с, а удельный расход воды на тушение  $0,7 \text{ л/м}^2$ . Переходя от расчетно-теоретических удельных расходов воды на тушение древесины и времени ее тушения к практически реализуемым при тушении пожаров, следует иметь в виду три важных обстоятельства.

1. На практике при тушении пожаров древесины недопусти-

мо снижать температуру прогретого слоя горячей древесины до температуры начала ее пиролиза, т.е.  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ . Ее следует снизить до начальной температуры окружающей среды ( $20^{\circ}\text{C}$ ), чтобы не было повторного воспламенения. При этом даже теоретически удельный расход воды возрастает несущественно, примерно до  $0,7 \text{ л/м}^2$ . В процессе тушения пожара ТГМ воду следует подавать не до охлаждения горящих поверхностей ТГМ до начальной температуры  $20^{\circ}\text{C}$ , а подавать ее до полного насыщения (увлажнения) этих поверхностей водой. Если всю впитываемую древесиной воду отнести к  $q_{\text{уд}}^{\text{ТР}}$ , что резко повысит безопасность повторного воспламенения непосредственно после тушения данного пожара, то  $q_{\text{уд}}^{\text{ТР}}$  возрастет до  $1,5 \text{ л/м}^2$ , а с учетом коэффициента поверхности горения  $K_{\text{П}} = 2 \div 2,5$   $q_{\text{уд}}^{\text{ТР}}$  возрастает соответственно в  $2 \div 2,5$  раза:

$$q_{\text{уд}}^{\text{ТР(прак)}} \approx q_{\text{уд}}^{\text{ТР}} K_{\text{П}} \approx (2 \div 2,5) 1,5 \approx 3,3,75 \text{ л/м}^2.$$

Таким образом, расчетный требуемый удельный расход воды на тушение твердых горючих материалов, который может быть в пределе реализован на практике,  $q_{\text{уд}}^{\text{ТР(прак)}} \approx 3 \div 4 \text{ л/м}^2$ .

При принятой оптимальной интенсивности подачи воды и установленной практически нормативной интенсивности подачи  $I_{\text{н}} = 0,08 \div 0,1 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$  расчетное время тушения пожаров ТГМ получается равным:

$$t_{\text{Т}} = \frac{q_{\text{уд}}^{\text{ТР(прак)}}}{I_{\text{н}}} = \frac{4}{0,1} \approx 40 \text{ с.}$$

Однако прежде чем сравнивать эти расчетные значения  $q_{\text{ТР}}$  и  $t_{\text{Т}}$  с реализуемыми в практике пожаротушения, учтем еще два важных обстоятельства, отличающие реальные условия тушения пожара от расчетной схемы.

2. Второе отличие состоит в том, что в расчетной схеме предполагалось, что вся требуемая на тушение пожара вода равномерно и одновременно подается на всю горящую поверхность. На практике же при тушении пожаров ТГМ, ЛВЖ, ГЖ в больших резервуарах или при больших проливах горючих жидкостей пожар тушится последовательно, по участкам. Фактически, огнетушащие средства подаются сначала на один, затем на другой участок и т.д., пока не будет потушена вся площадь пожара. Тушение приходится вести под непрерывным и интенсивным тепловым и газодинамическим воздействием факел-

ла пламени, горящего на смежных участках. Да и после прекращения процесса горения на данном участке это воздействие пламени со смежных участков не прекращается до момента полного прекращения процесса горения на всей площади пожара. Поэтому даже после прекращения процесса горения на том или ином участке пожара на него следует подавать еще какое-то время некоторое количество огнетушащих средств, чтобы предотвратить его повторное воспламенение под воздействием смежных зон горения. Это обстоятельство также ведет к непроизвольному и неизбежному увеличению требуемых удельных расходов воды на тушение и времени тушения пожара.

3. Наконец, третье важнейшее обстоятельство, которое следует учитывать при сравнении расчетно-теоретических удельных расходов воды и времени тушения пожаров ТГМ, реализуемыми на практике, состоит в том, что при расчете предполагали, что вся требуемая для тушения пожара вода равномерно распределяется по поверхности горения. На практике при горении ТГМ чаще всего более половины горящих поверхностей недоступно для прямого нанесения на них огнетушащих средств. Это все затененные, скрытые поверхности горения, куда прямое попадание воды затруднено или вовсе невозможно. Это обстоятельство нарушает принятую расчетную схему, а на практике сильно затрудняет процесс тушения пожара. Опытные практические работники знают, тушение пожара твердых горючих материалов - это прежде всего тушение скрытых поверхностей горения.

Это обстоятельство также резко увеличивает требуемые удельные расходы воды на тушение пожаров и время их тушения. Причем из сказанного очевидно, что чем больше площадь пожара, тем труднее осуществить равномерную подачу воды на горящую поверхность, тем больше недоступных скрытых поверхностей, сложнее процесс тушения и, соответственно, больше удельный расход воды на тушение пожара и больше время его тушения.

Обработка результатов тушения обычных пожаров ТГМ, по данным ряда зарубежных стран и нашей страны, позволила установить зависимость  $q_{тр}^{прак} = f(F_{п})$  - требуемого удельного расхода воды (и времени тушения пожаров) от площади пожара.

Для обычных пожаров ТГМ в зданиях эта зависимость описывается уравнением вида  $\lg q_{уд}^{тр} = 1,1 \lg F_{п} - 0,203$  или, с достаточной для практических целей точностью, можно считать, что  $q_{уд}^{тр} = 0,5 F_{п}$ .

Знание этого важного параметра процесса тушения позволяет вычислить практически все остальные технические параметры процесса тушения пожара и даже дать объективную сравнительную оценку эффективности и качества тушения того или иного ординарного пожара.

### § 9.5. Комбинированные огнетушащие средства.

#### Оптимизация способов подачи огнетушащих средств

Для тушения наиболее сложных (развитых) пожаров и тушения пожаров, связанных с горением некоторых видов горючих веществ и материалов, не допускающих применения в качестве огнетушащих средств обычных средств тушения, нередко применяют комбинированные огнетушащие средства.

Существует два способа применения комбинированных средств тушения:

1. Совмещение различных компонентов в одном (комбинированном) огнетушащем средстве (т.е. создание огнетушащих средств сложного рецептурного состава).

2. Раздельная (одновременная или последовательная) подача различных огнетушащих средств в зону горения.

Принцип создания комбинированных огнетушащих средств основан на выгодном сочетании или взаимном усилении (синергизме) механизмов тушения отдельных компонентов, входящих в состав огнетушащего средства (или в их комбинацию).

Примером огнетушащих средств сложного рецептурного состава являются некоторые виды порошковых средств тушения, пенные средства пожаротушения и др. Примером комбинированного способа тушения является тушение послеаварийных пожаров самолетов и вертолетов такими сочетаниями ОС как вода + пена; порошок + пена, тушение пожаров ЛВЖ, ГЖ на резервуарах комбинацией типа вода + пена; порошок + пена и т.д.

Примером простейшего огнетушащего комбинированного средства может служить химическая пена (ХП). Как известно ХП, полученная из порошка ППП, состоит из 80%  $CO_2$  и 20% водного раствора солей и ПАВ. Прекращение процессов горения химической пеной осуществляется за счет изолирования паров жидкости от зоны горения. По такому же механизму прекращения горения действует и воздушно-механическая пена (ВМП). Однако между ними есть существенная разница. При разрушении ХП выделяющаяся углекислота эффективно воздействует на зону горения по механизму прекращения горения нейтральных

газов и тем самым дополнительно снижает интенсивность горения. ВМП при подаче ее на поверхность ГЖ в тех же условиях не будет так эффективно снижать интенсивность горения, так как при ее разрушении выделяется воздух, который поддерживает горение.

Огнетушащую эффективность ВМП можно повысить за счет оптимизации ее подачи при тушении пожаров. Если в процессе тушения ЛВЖ и ГЖ воздушно-механической пеной меняются теплофизические параметры прогретого слоя, то и параметры пены должны меняться.

Например, в начальной стадии тушения пожара необходимо подавать пену с такой кратностью, которая обеспечивала бы интенсивное охлаждение прогретого слоя горючей жидкости. В следующей стадии пену подавать нужно с высокой кратностью для того, чтобы быстро создать на поверхности ГЖ слой, обеспечивающий паронепроницаемость. Другим примером комбинированных огнетушащих средств являются водно-газовые пены. Они представляют собой дисперсную систему, в которой дисперсной фазой является какой-либо газ ( $N_2$ ,  $CO_2$ , фреон и др.), а дисперсионной средой - водный раствор ПАВ. Анализ процесса тушения диффузионных пламен горючих жидкостей показывает, что наиболее рациональным способом доставки негорючих газов или химически активных ингибиторов в зону горения являются пены. При их разрушении выделяющийся газ попадает в зону горения вместе с парами ГЖ. Чем больше кратность водно-газовых пен, тем эффективней будет их воздействие на зону горения.

Исследования, проведенные с азотной, углекислотной и фреоновой (фреон 13В1) пенами показали, что замена в них воздуха другими газами повышает огнестойкость пен (табл. 9.2).

Газ-наполнитель при разрушении пены попадает в зону горения и снижает интенсивность тепловыделения. Данные, приведенные в табл. 9.2, получены в лабораторных условиях и могут служить только для качественной оценки.

Огнетушащая эффективность водно-газовых пен приведена на рис. 9.4. Данные получены на полигонных испытаниях. Сокращение времени тушения комбинированными пенами (в 2 ÷ 10 раз) происходит за счет совокупности факторов огнетушащего воздействия на горение жидкости (разбавление паров ГЖ негорючими газами или химическое торможение реакции горения и др.). Комбинированные пены тушат и гидрофильные жидкости.

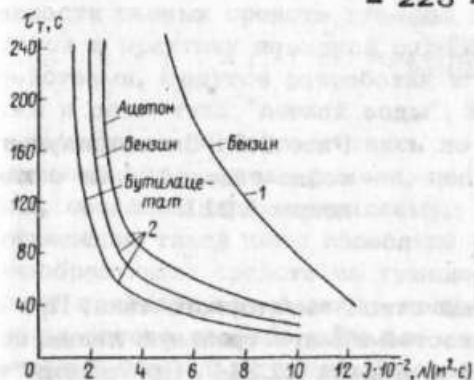


Рис. 9.4. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи водно-газовой пены (наполнитель фреон 13В1,  $K_{II} = 100$ ): 1 - тушение воздушно-механической пеной; 2 - тушение водно-газовой пеной

Таким образом, водно-газовые пены значительно превосходят по огнетушащей эффективности ВМП и могут применяться как для локального, так и для объемного тушения различных веществ и материалов, включая и гидрофильные жидкости. В качестве наполнителя пен можно использовать "воздух (90-99% + фреон (10-1%)" или " $N_2$  (80-99%) + фреон (20-1%)".

Таблица 9.2

Кратность пены	Пенообразователь	Концентрация пенообразователя, об.%	Газовый компонент пены	Огнестойкость пены, R, с
120	ПО-1	4	Воздух	12
90	ПО-1Д	4	Воздух	7
155	ПО-1	4	Азот	28
160	ПО-1	4	Фреон 13В1	120

Недостатками комбинированных пен являются их высокая стоимость, острый дефицит фреона 13В1 (Х2402), а также дополнительное оборудование для их подачи.

Во Франции получена водно-газовая пена, где в качестве газа-наполнителя используется фреон 12В1 (Х1211), имеющий температуру кипения при атмосферном давлении  $-4^{\circ}C$  и критическое давление 38,7 атм. Принципиальная схема установки для получения пен показана на рис. 9.5.

В большом резервуаре находится водный раствор ПАВ (6%) под давлением сжатого газа ( $N_2$ ;  $CO_2$ ), в маленьком - сжиженный фреон 12В1 под давлением азота. Выходные патрубки обеих емкостей соединяются в одну магистральную линию, на

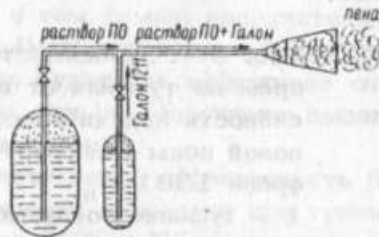


Рис. 9.5. Схема получения водно-газовой пены с кладоном 1211

конце которой имеется пенный ствол эжекторного типа. При открытии выходных кранов емкостей в магистральную линию поступает водный раствор ПАВ и жидкий Х1211. При выходе из сопла насадка струя подсасывает воздух и вспенивается. Одновременно Х1211 переходит в газообразное состояние и дополнительно вспенивает струю. Кратность получаемой пены 20-25. При резком падении давления за соплом снижается и температура пены, выходящей из сопла, и составляет 1-2<sup>0</sup>С. Таким образом, в установке, не имеющей механических устройств (насосов, сеток и т.п.), получается водно-газовая пена с содержанием Х1211 от 15 до 33% по массе. Такая схема получения пены применяется в портативных и возимых огнетушителях, на автомобилях аэродромного тушения. Дальность струи пены составляет для огнетушителей 6-15 м, для автомобилей до 30 м. Об эффективности этого метода тушения можно судить по данным огневых испытаний, приведенных в табл. 9.3. В качестве горючих жидкостей в первом случае применялся керосин, а остальных - авиационное топливо.

Таблица 9.3

Количество ГЖ, л	Площадь разлива, м <sup>2</sup>	Время свободного горения, с	Удельный расход, л/м <sup>2</sup>	Интенсивность подачи по раствору, л/(м <sup>2</sup> ·с)	Время тушения, с
1200	120	95	1,0	0,042	24
5000	400	60	5,0	0,125	40
5000	512	60	4,5	0,129	35

Высокая огнетушащая эффективность данного метода позволяет применять его при тушении пожаров классов А, В, С и пожаров самолетов при их аварийной посадке.

Кроме описанных способов повышения огнетушащей эффек-



тивности пенных средств тушения ведутся разработки и внедряются в практику пожарной охраны пены с совершенно новыми свойствами. Ведутся разработки и для получения твердеющей пены и пены типа "легкой воды". Необходимо получить такую пену, которая легко растекаясь по поверхности ГЖ через определенный промежуток времени, под воздействием тепла твердеет, создавая паронепроницаемую корку на поверхности ГЖ. Применение такой пены позволило бы резко сократить расход пенообразующих средств на тушение пожаров. Предварительные опыты показали возможность получения стойких твердеющих пен на основе водорастворимых синтетических смол - фенола и мочевино-формальдегидных. Предварительно определен и оптимальный состав твердеющей пены:

смола (мочевино-формальдегидная) 35 ÷ 45 об.%;  
 вода 50 ÷ 60 об.%;  
 ПО-1 1 ÷ 2 об.%;  
 катализатор отверждения (HCl) 2 ÷ 4 об.%.

Огневые полигонные испытания такой пены дали результаты, приведенные в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Тип пены	Интенсивность подачи пены, л/(с·м <sup>2</sup> )	Кратность К <sub>п</sub>	Стойкость S, с.	t, с	Примечание
Пена на основе ПО-1 (4% р-р)	0,85	6,9	330	40-50	Площадь резервуара 1,3 м <sup>2</sup>
Пена, полученная из раствора мочевино-формальдегидной смолы, пенообразователя и добавки (HCl)	0,85	6,7	-	25-30	При тушении не наблюдалось вскипания и выбросов. ГЖ - бензин, t св.гор - 2 мин

После прекращения горения затвердевший слой пены легко удаляется с поверхности горючего.

Большой интерес представляет воздушно-механическая пена низкой кратности ( $K_{\Pi} = 8+10$ ) под условным названием "легкая вода". Стойкость этой пены относительно невелика, в нормальных условиях 25% ее первоначального объема разрушается через 4-5 мин. Генерация пены осуществляется с помощью обычного оборудования, применяемого для получения ВМП. Однако сам пенообразователь и полученная из него пена обладают рядом свойств, обеспечивающих исключительно высокую эффективность при тушении пожаров ЛВЖ и ГЖ.

Максимальная толщина требуемого слоя пены не превышает  $15 \div 25$  мм. Такая пленка длительное время находится на поверхности ГЖ, изолируя зеркало жидкости от окружающего пространства и препятствуя выходу ее паров. Пена обладает очень высокой текучестью, что значительно облегчает покрытие сплошным слоем даже относительно больших площадей зеркала горючей жидкости.

Для оценки огнетушащей эффективности пен типа "легкой воды" в условиях, приближенных к натурным, было проведено несколько серий стендовых и натуральных испытаний. В качестве ЛВЖ применялся авиационный бензин. Площадь разлива в одном случае составляла  $420 \text{ м}^2$ , а во втором  $1000 \text{ м}^2$ . Результаты экспериментов приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5  
Сравнительные данные по тушению пожаров пенами  
на основе различных пенообразователей

Вид пенообразова- теля	Время туше- ния, с	Время подачи пены, с	Коли- чество поданно- го раст- вора, л	Удель- ный расход, л/м <sup>2</sup>	Интенсив- ность по- дачи по раствору, л/(м <sup>2</sup> .с)
Обычный	90	-	1460	3,47	0,0385
"Легкая вода"	37	-	600	1,43	0,0387
Обычный	149	357	6600	6,95	0,0195
"Легкая вода"	60	78	2300	2,36	0,0302
"Легкая вода"	75	90	2870	3,02	0,0334

Из табл. 9.5 видно, что при одинаковой интенсивности время тушения и расход огнетушащего средства при подаче "легкой воды" вдвое меньше, чем при применении обычных ВМП. Эффективность "легкой воды" как огнетушащего средства в 2-3 раза выше по сравнению с обычными пенами. Сравнивая при-

веденные данные, определяющие огнетушащую эффективность "легкой воды", следует учитывать то обстоятельство, что большинство из них получено при испытаниях по стандартным методам зарубежных стран, которые существенно отличаются от методов испытания, принятых в СССР.

В ряде стран ведутся интенсивные разработки по совершенствованию порошковых огнетушащих средств. К достоинствам ПОС помимо их высокой огнетушащей эффективности, относятся: универсальность, т.е. способность подавлять горение различных, в том числе пирофорных, соединений и веществ, не допускающих тушения водой и пенами (металлы и металлоорганические соединения и т.п.). ПОС применяют для тушения пожаров электрооборудования, находящегося под напряжением; пожаров при минусовых температурах и др.

Вместе с тем, огнетушащие порошки обладают и известными недостатками, основным из которых является их склонность к слеживанию и комкованию.

Для придания порошкам гидрофобных свойств применяют стеараты металлов (соли стеариновой кислоты -  $(C_{17}H_{35}COO)_3Al$ ;  $(C_{17}H_{35}COO)_3Mg$ ;  $(C_{17}H_{35}COO)_3Fe$ ), которые препятствуют отсыреванию порошков и их слеживанию. Стеараты металлов являются остродефицитными соединениями. В качестве заменителя стеаратов используются модифицированные кремнеземы, например, аэросил (АМ-1-300) - порошок кремния, обработанный (модифицированный) ПАВ для стабилизации гранулометрического состава, представляющий собой твердое высокодисперсное гидрофобное вещество. Такая замена позволяет, с одной стороны, значительно понизить склонность порошков к увлажнению и слеживанию, а с другой - широко применять комбинированный способ тушения "порошок + пена". Более того, кремнеземы можно модифицировать ХАИ, а также получать такие соединения кремнезёмов, в которых химическая связь между Si и ХАИ ослаблена. Это позволит вводить в зону горения ингибиторы вместе с порошком, а при термическом воздействии ХАИ будут выделяться в чистом виде.

Исследования механизма прекращения горения, проведенные в последние годы у нас в стране и за рубежом, показали, что доминирующая роль в ингибировании пламени порошками принадлежит якобы процессу гетерогенной рекомбинации радикалов и атомов. Именно это обстоятельство обуславливает повышенную эффективность и универсальность огнетушащего действия порошков. В отличие от летучих ингибиторов, гетерогенные ин-

гибиторы универсальны по отношению ко всем активным центрам, а процесс рекомбинации носит необратимый характер. В результате этих исследований выявлены чрезвычайно перспективные соли, например, оксалаты щелочных металлов (соли щавелевой кислоты  $Me_2C_2O_4$ ), которые во много раз превосходят по эффективности соли, применяемые в настоящее время для изготовления порошков. Повышенная эффективность таких солей обуславливается их способностью растрескиваться в пламени, создавая большое число мельчайших частиц, но эти соли при разложении выделяют CO.

В настоящее время создали новые порошки, представляющие собой комбинацию сильных ингибиторов (бикарбонатов калия или натрия) и порофоров (мочевины), например, синтетический порошок "Моннекс", отличающийся высокой эффективностью (табл. 9.6) тушения.

Особое место занимают весьма эффективные порошковые составы типа СИ, представляющие собой силикагель, насыщенный галогенированными углеводородами. Тушение такими комбинированными огнетушащими составами достигается частично за счет изолирующей способности порошковой основы и в основном за счет ингибирующего воздействия на пламя десорбирующего из силикагеля газового компонента. Так как применяемые в этих составах комплексы являются дефицитными, то сделана попытка модернизировать эти составы. В качестве порошковой основы применили вспученный перлитовый песок, а в качестве наполнителя бромистый метилен. Испытывались следующие составы:

на основе силикагеля и бромистого метилена (50%  $CH_2Br_2$  по массе);

на основе вспученного перлитового песка и тетрафтордибромэтана (20% по массе  $C_2F_4Br_2$  - X2402);

на основе вспученного перлитового песка и бромистого метилена (2% по массе  $CH_2Br_2$ ).

Испытания показали, что перспективным является состав на основе вспученного перлитового песка, насыщенного 20% тетрафтордибромэтана (X2402). Он не уступает по эффективности составу СИ-2, дешевле его, причем не погружается в слой горящего при тушении (состав СИ-2 тонет). Это различие в удельных весах дает значительную разницу в расходах при тушении. Недостаток состава на перлитовой основе как и всех порошковых огнетушащих средств - после тушения возможно повторное воспламенение материала. Для устранения этого недостатка в последние годы применяют комбинированный способ тушения.

## Огнетушащие порошки

Наименование порошка	Назначение	Состав	Норма расхода, кг/м <sup>2</sup>
1	2	3	4
Novo-Troxin (ФРГ)	Пожары классов В, С, Е	Бикарбонат натрия, добавки талька и стеарата металла	2,5 ÷ 4,0
Milti-Troxin (ФРГ)	Пожары классов А, В, С, D, Е (исключение Na, Li, Zs, Rb)	Смесь фосфорно-алюминиевых солей с сернистыми солями, стеараты металлов и другие добавки	2,5 ÷ 4,0
Novo-Troxin SV (ФРГ)	Пожары классов В, С, Е. Порошок, совместимый с пеной	Бикарбонат натрия, добавки CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> , стеараты металлов	2,5 ÷ 4,0
VSE (ФРГ)	Пожары классов В, С, Е	Бикарбонат натрия, стеараты металлов	2,5 ÷ 4,0
New-Swift (Англ.)	Пожары классов А, В, С, D, Е	Бикарбонат натрия с добавками	2,5 ÷ 4,0
Favorit (ФРГ)	То же	Фосфорноаммонийные соли с добавками	2,5
Monnex (Англ.)	То же	Сплав бикарбоната калия с мочевиной, гидрофобизирующая добавка	0,5 ÷ 1,0

1	2	3	4
Jooson (ФРГ)	То же	Бикарбонат натрия с добавками	2,5 ÷ 4,0
ПСБ (СССР)	Общего назначения для тушения ЛВЖ, масел растворителей и электроустановок	Бикарбонат натрия, тальк, кремний-органическая добавка	2,5
ПФ (СССР)	Пожары ЛВЖ, масел растворителей и тлеющих материалов (древесина, уголь)	Фосфорноаммонийные соли, тальк, кремнийорганическая добавка	2,5
П-1 (СССР)	То же	Фосфорноаммонийные соли, стеараты металлов	2,5
ПС (СССР)	Пожары щелочных металлов	Углекислый натрий, стеараты металлов, графит	20 ÷ 40
СИ-2 (СССР)	Пожары пирофорных соединений (металлоорганические гидриды и т.п.)	Силикагель (МСК, ШСК, КСК), фреон 114В2	20 ÷ 30 для пирофорных, 0,2÷0,5 для нефтепродуктов
Granito (Франц.)	Пожары веществ классов В,С,Е	Бикарбонат натрия с добавками	2,5

Принцип этой комбинации основан на том, что порошковые ОС весьма эффективно сбивают пламенное горение. Но в условиях развитого пожара, на потушенных порошками участках через 20÷30 с возникает повторное горение и пожар вновь развивается с прежней интенсивностью.

Применение же пены по горящему розливу ЛВЖ, ГЖ малоэффективно из-за ее интенсивного разрушения под действием факела пламени.

В то же время пена, поданная на участки пролива ЛВЖ, ГЖ предварительно протушенные с помощью порошковых ОС, весьма эффективно предотвращает их повторное воспламенение. Такое сочетание огнетушащих механизмов двух различных ОС (порошков и пен) дает отличные результаты, например, при тушении сложных аэродромных пожаров. Это обстоятельство послужило основанием даже для разработки рядом зарубежных фирм специальных пожарных машин комбинированного порошково-пенного тушения аэродромных пожаров розлива ЛВЖ, ГЖ.

Комбинированные средства пожаротушения применяются и для тушения обычных видов горючих материалов типа древесины, резино-технических изделий и другими традиционными средствами тушения, например, водой, с целью повышения ее огнетушащей эффективности.

Повышают огнетушащую эффективность воды двумя способами: путем добавления поверхностно-активных веществ и загустителей.

Уменьшение поверхностного натяжения значительно увеличивает растекаемость воды, способствует дроблению ее на мелкие капли, проникновению в капилляры горящего материала, т.е. увеличивается площадь соприкосновения с горячей поверхностью, а следовательно, и общее количество отводимого тепла.

Вязкость воды можно увеличить, добавив к ней небольшое количество загустителя. В качестве загустителей могут использоваться различные органические соединения, производные целлюлозы. Согласно данным работы [21] наибольший эффект тушения достигается при увеличении вязкости воды до 2-3 сст. Дальнейшее увеличение вязкости воды якобы практически не сказывается на эффективности тушения. В то же время известны работы [13], где наибольший эффект тушения некоторых видов ТГМ достигается при вязкости 50-60 сст, есть работы и по повышению вязкости водных растворов под воздействием тепловых потоков от факела пламени до 5-6 тысяч сст.

Влияние загустителей на тушение пожара приведено в табл. 9.7. Эффективность тушения оценивалась по коэффициенту использования. Из табл. 9.7 видно, что при добавлении к воде незначительного количества загустителя, коэффициент ее использования повышается в 1,8 раза.

Таблица 9.7

Наименование вещества	Вязкость, сст	Коэффициент использования
Оксипропилцеллюлоза	2,5	1,82
Метилксипропилцеллюлоза	2,5	1,59
Метилцеллюлоза	2,5	1,56
Натриевая соль полиактиловой кислоты	2,5	1,45
Натрийкарбоксиметилцеллюлоза	2,5	1,25
Вода	2,5	1,0

Рассмотрим пути повышения эффективности веществ и составов химического торможения реакций горения. В настоящее время в качестве огнетушащих средств, прекращающих горение по механизму химического торможения, применяют галондированные углеводороды. Огнетушащая эффективность их возрастает с увеличением молекулярного веса содержащегося в них галоида, т.е. в последовательности: фторзамещенные, хлорзамещенные, бромзамещенные, йодзамещенные.

Наиболее распространенные галонды (хладоны) приведены в табл. 9.8, а наиболее распространенные составы в табл. 9.9.

Совершенствование составов идет в основном по пути подбора веществ с такими свойствами, которые в смеси дают наилучший эффект тушения. В качестве примера можно рассмотреть:

1. Огнетушащий состав для огнетушителя в аэрозольной упаковке. Состав представляет собой смесь хладонов 2402 и 1301 (фреонов 114В2 и 13В1).

Тетрафтордибромметан ( $C_2F_4Br_2$ ) - хладон 2402 (фреон 114В2). При нормальных условиях - тяжелая бесцветная жидкость со специфическим запахом;  $t_{кип} = 47,26^{\circ}C$ ;  $t_{замерз} = -110,5^{\circ}C$ ;  $p_{крит} = 34 \text{ кгс/см}^2$ .

Трифторбромметан ( $CF_3Br$ ) - хладон 1301 (фреон 13В1). При нормальных условиях - бесцветный газ;  $t_{кип} = -57,75^{\circ}C$ ;  $t_{замерз} = -168^{\circ}C$ ;  $p_{крит} = 39,1 \text{ кгс/см}^2$ .



Таблица 9.8

Наименование	Химическая формула	Хладон	Огнетушательная концентрация, % об.
Метилбромид	$\text{CH}_3\text{Br}$	1001	2,7
Бромистый метилен	$\text{CH}_2\text{Br}_2$	1002	2,4
Бромформ	$\text{CHBr}_3$	1003	-
Хлорбромметан	$\text{CH}_2\text{ClBr}$	1011	-
Тетрахлорметан	$\text{CCl}_4$	1040	-
Дифтордибромметан	$\text{CF}_2\text{Br}_2$	1202	-
Дифторхлорбромметан	$\text{CF}_2\text{ClBr}$	1211	5,2
Трифторбромметан	$\text{CF}_3\text{Br}$	1301	4,9
Этилбромид	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	2001	4,5
Тетрафтордибромметан	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	2402	1,95

Таблица 9.9

Наименование составов	Содержание компонентов, % по весу			
	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$	$\text{CO}_2$ (жидкость)	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	$\text{CH}_2\text{Br}_2$
3,5	70	30	-	-
7	20	-	-	80
НД	97	3	-	-
БФ	73-84	-	27-16	-
БМ	70	--	-	30

Оба вещества летучие галогидорганические соединения, обладающие высокой стабильностью и умеренной токсичностью (на уровне слабых наркотиков). Для повышения эффективности работы при низких температурах (0 - 50°C) добавляют фреон 14 ( $\text{CF}_4$ ) и  $\text{N}_2$ . Они хорошо растворяются в смеси хладонов 2402 и 1301 и не повышают давления с ростом температуры.

На испытаниях смесь хладонов (2402 - 75% и 1301 - 25%) дала хорошие результаты - площадь горящего бензина в 0,63 м<sup>2</sup> была потушена ручным аэрозольным огнетушителем за 20 с.

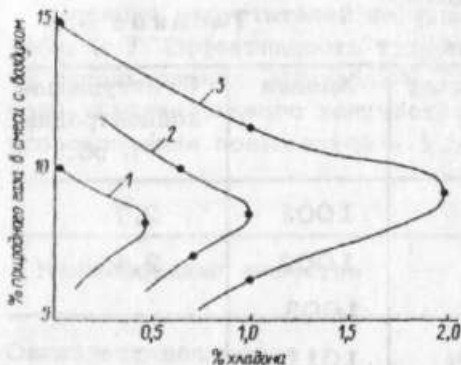


Рис. 9.6. Области воспламенения природного газа в зависимости от концентрации хлорона 2402 при разбавлении воздуха азотом

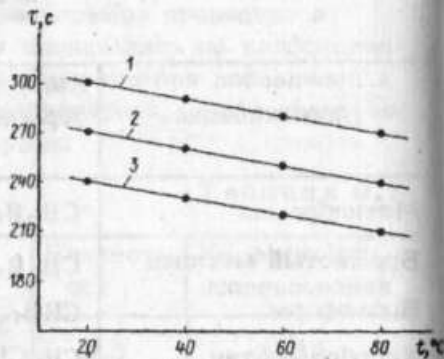


Рис. 9.7. Зависимость стойкости пены от температуры бензина при совместной подаче на его поверхность пены и порошка: 1 - без порошка; 2 - ПФ; 3 - ПСБ

2. Новый огнетушащий состав для объемного тушения. Предварительные испытания показали, что хладон 2402 хорошо тушит богатые горючие смеси ( $\alpha < 1$ ). Из графика, приведенного на рис. 9.6, видно, что разбавление смеси природный газ + воздух азотом на 10% снижает огнетушащую концентрацию хлорона в 2 раза, а при разбавлении на 20% пиковая огнетушащая концентрация хлорона составляет всего 0,5 - 0,6%.

Приведенные примеры показывают, как можно совершенствовать составы химического торможения реакций горения. Однако острый дефицит хладонов и токсичность продуктов пиролиза пока сдерживают широкое применение этих составов.

3. Возможности комплексного применения обычных огнетушащих средств. Известно, что порошковые огнетушащие средства (например, ПСБ и ПФ) хорошо тушат, но не обладают охлаждающим действием поверхности горючего материала, поэтому после их применения горение может вновь возобновляться. Для исключения повторного воспламенения тушение необходимо проводить в два приема: сначала порошком, а потом пеной. Основная трудность такого комбинированного применения заключается в том, что пена на порошке сильно разрушается. На рис. 9.7 приведены результаты исследования по совместному использованию пены и порошка, где показана стойкость пены при нормальной и повышенной температуре (до  $+80^{\circ}\text{C}$ ), поданной на поверхность горючего. Из графика видно, что стой-

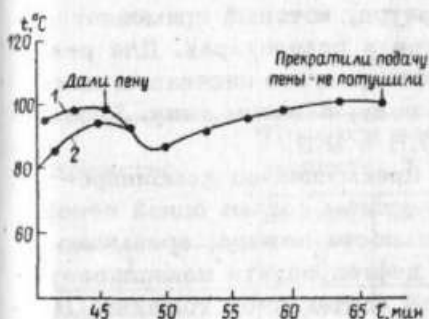


Рис. 9.8. Тушение бензина в резервуаре диаметром 5,3 м воздушно-механической пеной: 1 - температура на поверхности бензина; 2 - температура на глубине 400 мм

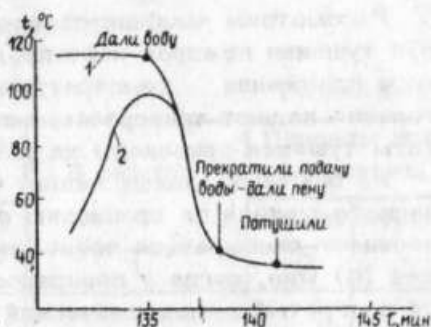


Рис. 9.9. Тушение бензина в резервуаре диаметром 5,3 м комбинированным методом распыления вода + пена: 1 - температура на поверхности бензина; 2 - температура на глубине 400 мм

кость пены на бензине уменьшается пропорционально повышению температуры и подачи на поверхность горючего порошка. Разрушению способствуют добавки, например, стеараты металлов, силиконы и др. Таким образом, совместное применение порошков и пен станет возможным, если обеспечить хорошую стойкость пены за счет модернизации порошков, в частности, путем замены гидрофобных добавок.

Комбинированный метод тушения нефтепродуктов ВМП. При подаче пены на поверхность горячей жидкости происходит интенсивное ее разрушение. Поскольку доминирующим процессом при тушении пенами является изолирование паров горючей жидкости от зоны горения, то чем быстрее будет достигнута критическая толщина слоя пены, тем быстрее прекратится горение. Для этого перед подачей пены на поверхность горючей жидкости наносили слой какого-либо материала с  $\rho < \rho_{ГЖ}$ . В этом случае поверхность горючей жидкости и пена будут разделены между собой; разрушение пены снизу станет менее интенсивным, что дает возможность сократить время тушения. В качестве материала для "подушки" использовался продукт химического производства пламилон, тонкодисперсный порошок, свободно плавающий на поверхности ГЖ. Опыты по тушению таким методом дали положительные результаты.

Рассмотрим комбинированный метод, который применяется при тушении пожаров нефтепродуктов в резервуарах. Для резкого понижения температуры нефтепродукта сначала в зону горения подают тонкораспыленную воду, а затем пену. Результаты тушения приведены на рис. 9.8 и 9.9.

Из опытных данных видно, что преимущество комбинированного метода по сравнению с тушением только одной пеной, начинает сказываться после длительности пожара, превышающей 30 мин, когда у поверхности нефтепродукта накапливается прогретый гомотермический слой достаточной толщины. При этом (см. рис. 9.8) охлаждающее действие пены свелось к тому, что температура прогретого слоя в начале понизилась со 100 до 90°C, а затем медленно стала возрастать вновь. Тушение пожара пеной в этом случае не было достигнуто, хотя пена покрыла всю поверхность горящего бензина.

Когда прогретый слой бензина предварительно охлаждался тонкораспыленной водой (см. рис. 9.9) до температуры ниже 50°C, то пожар был потушен пеной в течение нескольких минут. Расход пенообразующих средств при этом сократился примерно в два раза по сравнению с расходом при тушении одной пеной.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица I

Вещество	Пределы воспламенения, %		Вещество	Пределы воспламенения, %	
	нижний	верхний		нижний	верхний
1	2	3	1	2	3
Амилен	1,60	-	Изопропиловый спирт	2,65	-
Амиловый спирт	1,19	-	Метан	5,00	15,00
Амилацетат	1,10	-	Метилацетат	3,15	15,60
Аммиак	15,50	27,00	Метил-бутил-кетон	1,55	8,15
Ацетальдегид	3,97	-	Метиловый спирт	6,72	36,50
Ацетилен	2,50	80,00	Метилформиат	5,05	22,70
Ацетиленди-хлорид	9,70	12,80	Метилцикло-гексан	1,15	-
Ацетон	2,55	12,80	Метил-этил-кетон	1,81	9,50
Бромистый метил	13,50	14,50	Метил-этило-вый эфир	2,00	10,10
Бромистый этил	6,75	11,25	Нонан	0,83	-
Бутан	1,86	8,41	Окись пропи-лена	2,00	22,00
Бутилацетат	1,70	-	Окись углерода	12,50	74,20
Бутилен	1,70	9,00	Окись этилена	3,00	80,00
Бутиловый спирт	1,70	-	О-ксилол	1,00	6,00
Виниловый эфир	1,70	27,00	Октан	0,95	-
Водород	4,00	74,20	Пропан	2,37	9,50
Гексан	1,25	6,90	Пропиалацетат	2,05	-
Гептан	1,00	6,00	Пропилен	2,00	11,10
Декан	0,67	-	Пропиловый спирт	2,55	-
Диоксан	1,97	22,25	Сероводород	4,30	45,50
Диэтил пере-кись	2,34	-	Сероокись уг-лерода	11,90	28,50
Изоамиловый спирт	1,20	-	Сероуглерод	1,25	50,00
Изобутан	1,80	8,44	Толуол	1,27	6,75
Изобутиловый спирт	1,68	-	Хлористый амил	1,40	-
Изопентан	1,32	-			
Изопропила-цетат	2,70	-			

1	2	3	1	2	3
Хлористый винил	4,00	21,70	Этилформиат	2,75	16,40
			Этан	3,22	12,45
Хлористый метил	8,25	18,70	Этилацетат	2,18	11,40
			Этилен	2,75	28,60
Хлористый этил	4,00	14,80	Этилендихлорид	6,20	15,90
			Этиловый спирт	3,28	18,95
Циклогексан	1,33	8,35	Этиловый эфир	1,85	36,50
Циклопропан	2,40	10,40	Бензол	1,41	6,75

Таблица II

Горючее вещество	Количество воздуха		
	кг/кг	м <sup>3</sup> /кг	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
1	2	3	4
Акриловая кислота	5,74	4,44	-
Акриловометиловый эфир	7,72	5,58	-
Амилацетат	10,10	7,80	-
Амиловый спирт	11,76	9,10	-
Аммиак	6,10	4,70	3,57
Анилин	11,50	8,90	-
Ацетилен	13,27	10,25	11,90
Ацетон	9,50	7,35	-
Бензин	15,00	11,60	-
Бензол	13,27	10,25	-
Битум	13,19	9,45	-
Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	5,10	3,95	-
Бутан	15,45	11,94	30,94
Бутилацетат	9,50	7,35	-
Бутиловый спирт	11,10	8,64	-
Водород	34,50	26,60	2,38
Гексан	15,20	11,79	45,22
Глицерин	5,24	4,06	-
Дизельное топливо (соляровое масло)	14,60	11,50	-

1	2	3	4
Диэтиловый эфир	11,08	8,65	-
Древесина при влажности, равной, %:			
40	5,43	4,20	-
20	4,84	3,74	-
30	4,58	3,54	-
Капролактam	10,00	7,76	-
Каучук :			
натуральный	12,93	10,00	-
синтетический СК-С	13,15	10,16	-
Керосин	14,70	11,36	-
Киноплeнка:			
нитроцеллюлозная	4,68	3,62	-
триацетатная	6,05	4,34	-
Мазут	14,60	11,30	-
Метан	17,20	13,32	9,52
Метиловый спирт	6,47	4,99	7,14
Нефть	14,60	11,80	-
Пентан	15,30	11,85	-
Полистирол	14,30	10,25	-
Полипропилен	15,90	11,42	-
Полиэтилен	15,90	11,42	-
Пенополиуретан	7,77	6,00	-
Скипидар	14,20	10,96	-
Стирол	15,30	11,85	-
Толуол	13,50	10,46	-
Торф при влажности, рав- ной, %:			
10	6,60	6,01	-
20	5,86	4,54	-
30	5,14	3,96	-
Этиловый спирт	9,00	6,95	-
Этиленгликоль	5,37	4,16	-

Таблица III

Горючее вещество	Состав продуктов горения, м <sup>3</sup> /кг			Количество продуктов горения,		
	CO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	кг/кг	м <sup>3</sup> /кг	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Акриловая кислота	0,96	0,62	3,50	6,76	5,08	-
Амилацетат	1,20	1,20	6,16	11,03	8,56	-
Амиловый спирт	1,27	1,53	7,20	12,72	10,00	-
Аммиак	-	1,97	3,71	6,21	5,68	4,32
Анилин	1,44	0,84	7,06	12,34	9,34	-
Ацетилен	1,73	0,86	8,11	14,20	10,70	12,40
Ацетон	1,16	1,16	5,82	10,48	8,14	-
Бензин	1,58	1,67	9,10	15,83	12,35	-
Бензол	1,73	0,86	8,11	14,20	10,70	-
Битум	1,49	1,16	7,74	16,88	10,39	-
Бумага, хлопок, хлопчатобумаж- ные ткани	0,83	0,69	3,12	6,17	4,64	-
Бутан	1,54	1,93	9,44	16,38	12,91	33,44
Бутилацетат	1,16	1,16	5,82	10,48	8,14	-
Бутиловый спирт	1,21	1,51	6,80	12,10	9,52	-
Водород	-	11,20	21,00	34,97	32,20	2,38
Гексан	1,56	1,82	9,33	16,18	12,71	48,72

1 240 -



1	2	3	4	5	6	7
Глицерин	0,73	0,97	3,20	6,21	4,9	-
Дизельное топливо (соляровое масло)	1,60	1,50	8,85	15,41	11,95	-
Диэтиловый эфир	1,21	1,51	6,83	12,14	9,55	-
Древесина при влажности, равной, %:						
10	0,84	0,74	3,28	6,35	4,86	-
20	0,74	0,75	2,93	5,73	4,42	-
30	0,65	0,78	2,56	5,10	3,99	-
Капролактан	1,20	7,10	6,24	11,50	8,54	-
Каучук:						
натуральный	1,50	1,35	7,91	13,79	10,76	-
синтетический СК-С	1,61	1,18	8,03	14,16	10,82	-
Керосин	1,61	1,70	8,98	15,74	12,29	-
Киноплёнка:						
нитроцеллюлозная	0,80	0,60	2,92	5,71	4,32	-
триацетатная	0,91	0,64	3,42	6,58	4,97	-
Мазут	1,65	1,40	8,81	15,40	11,86	-
Метан	1,40	2,80	10,52	18,15	14,72	10,52
Метиловый спирт	0,70	1,42	3,94	7,40	6,06	8,64
Нефть	1,57	1,57	8,72	15,25	11,86	-
Пентан	1,55	1,87	9,36	16,27	12,78	-
Полистирол	1,72	0,86	8,10	14,15	10,68	-
Полипропилен	1,60	1,60	9,02	15,74	12,22	-

1	2	3	4	5	6	7
Полиэтилен	1,60	1,60	9,02	15,74	12,22	-
Пенополиуретан	1,06	0,79	4,69	8,58	6,55	-
Скипидар	1,65	1,32	8,66	15,11	11,63	-
Стирол	1,72	0,86	8,10	14,15	10,68	-
Толуол	1,86	1,06	9,02	15,00	11,94	-
Торф при влажности, равной, %:						
10	0,98	0,67	4,01	7,41	5,66	-
20	0,87	0,71	3,56	6,74	5,14	-
30	0,76	0,74	3,12	5,99	4,62	-
Этиловый спирт	0,98	1,46	5,50	9,97	7,94	-
Этиленгликоль	0,72	1,08	3,25	6,35	5,06	-

Таблица IV

Горючее вещество или материал	Низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$ , кДж/кг	Горючее вещество или материал	Низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$ , кДж/кг
Амилацетат	33533,5	Каучук синтетический	45252,0
Амиловый спирт	39046,6	Керосин	43157,0
Анилин	34777,0	Кинопленка нитроцеллюлозная	15084,0
Ацетилен	56000,0	Кинопленка триацетатная	18779,6
Ацетон	30939,0	Мазут	41900,0
Бензин	43576,0	Масло соляровое	43069,0
Бензол	40807,0	Метан	35800,0
Битум		Нефть	46090,0
Бумага, хлопок, хлопчатобумажные ткани	13408,0	Полистирол	38967,0
Бутан	118300,0	Полиэтилен	47137,5
Бутиловый спирт	36144,9	Пенополиуретан	24302,0
Древесина при влажности, %:		Резина	33520,0
10	16500,0	Толуол	42355,4
20	14400,0	Торф влажностью 19%	16613,3
30	12200,0	Хлопок	15700,0
Капролактан	29749,0		
Каучук натуральный	44833,0		

Таблица V

Объекты, материалы	Скорость распространения горения, м/мин
1	2
Административные здания	1,0 - 1,5
Больницы:	
здания II степени огнестойкости	0,6 - 1,0
здания III и IV степени огнестойкости	2,0 - 3,0
Жилые дома (здания III степени огнестойкости)	0,5 - 0,8



Горящие материалы или объекты пожара	Усредненные значения линейной скорости распространения, м/с
Древесина (доски толщиной 2-4 см) в штабелях при влажности, %:	
8 - 12	0,067
16 - 18	0,038
18 - 20	0,027
20 - 30	0,02
более 30	0,017
Текстильные изделия в закрытом складе при загрузке около 100 кг/м <sup>2</sup>	0,0055
Бумага в рулонах в закрытом складе при загрузке около 140 кг/м <sup>2</sup>	0,045
Синтетический каучук в закрытом складе при загрузке около 200 кг/м <sup>2</sup>	0,067
Резинотехнические изделия в штабелях на открытой площадке	0,018
Поля добычи фрезерного торфа при скорости ветра, м/с:	
10 - 14	0,16
18 - 20	0,37
Покрытия цехов большой площади	0,028 - 0,053
Торфоплиты в штабелях (в закрытом складе)	0,017
Склады круглого леса в штабелях	
Степной пожар при высоком и густом травянистом покрове в засушливую погоду и сильном ветре	достигает 6,7 - 8,3
Степной пожар при редкой и низкой растительности и отсутствии ветра	до 0,27
Сельские населенные пункты при плотной застройке сгораемыми зданиями с соломенными кровлями, при сухой жаркой погоде и сильном ветре	0,42

Таблица VII

Горючие жидкости	Скорость выгорания		Горючие жидкости	Скорость выгорания	
	массовая кг/(м <sup>2</sup> .с)	линейная мм/с		массовая кг/(м <sup>2</sup> .с)	линейная мм/с
Ацетон	0,047	0,055	Нефть	0,02	0,0267
Бензол	0,038	0,052	Мазут	0,035	0,036
Бензин	0,045- -0,053	0,063- -0,075	Керосин	0,0483	0,06
Бутиловый спирт	0,0135	0,0186	Сероуглерод	0,036	0,0284
Диэтиловый эфир	0,06	0,083	Толуол	0,038	0,045
Изопентан	0,105	0,167	Этиловый спирт	0,0266- -0,0334	0,0334- -0,042

Таблица VIII

Твердые материалы		Приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м <sup>2</sup> .с)
1	2	2
Бумага разрыхленная		0,008
Древесина в изделиях ( W = 8 - 10%)		0,014
Калий металлический		-
Натрий металлический		-
Карболитовые изделия		0,0063
Органическое стекло		0,0143
Полистирол		0,0143
Пиломатериалы в штабеле на открытой площадке		0,112
Резино-технические изделия		0,0112
Текстолит		0,0067
Каучук натуральный		0,0133
Каучук синтетический		0,0088
Киноплёнка целлулоидная		1,17
Книги на деревянных стеллажах		0,0055
Торфоплиты ( W = 9-12%)		-

1	2
Торф в караванах ( W = 40%)	0,003
Хлопок разрыхленный	0,004
Штапельное волокно разрыхленное	0,0067
Этрол ацетицеллюлозный	0,015
Фенопласты	0,0058

Таблица IX

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

Таблица X

Помещения	Мебельный цех		Корпус мебельной фабрики	
	Пожарная нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	$K_{II}$	Пожарная нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	$K_{II}$
Отделение механической обработки древесины	125	1	78	0,7
Отделение сборки	40,4	2,33	45	1,05
Отделение отделки	-	-	70	1
Отделение окраски	-	-	35	2
Промежуточный склад	-	-	225	1,8
Склад фанеры	-	-	180	1,2

Таблица XI

Виды изделия	Масса изделия, кг	Коэффициент поверхности горения
Столы: письменные, кабинетные, канцелярские, лабораторные, кухонные; журнальный, чертежный, обеденный	15 - 30	4 - 6
Стулья	5 - 15	2 - 3
Шафы (книжные, платяные)	3 - 5	3 - 4,5
Диваны, кровати	25 - 30	5 - 10
Кресла	30 - 60	5 - 7
	5 - 10	5 - 8

Таблица XII

Вид объекта	Масса изделия, кг/м <sup>2</sup>	Коэффициент поверхности горения
Жилые и административные помещения	25 - 50	2 - 3
Производственные помещения, связанные с обработкой и хранением ТГМ	50 - 250	1,5 - 3
Склады, холодильники, магазины	250 - 500	2 - 5
Склады резинотехнических изделий, обуви, товаров промышленного производства	500 - 750	3 - 6
Склады лесопиломатериалов, высокостеллажные склады	500 - 2000	10-50(100)



Таблица XIII

Ощущение или воздействие	Интенсивность излучения, Вт/м <sup>2</sup>
Боль в незащищенных частях тела человека:	
через 3 с	10 480
через 14 с	4 180
через 24 с	2 800
При длительном воздействии	1 050
Нижний предел излучения, достаточный для воспламенения древесины любого вида при длительном воздействии источника излучения	12 580
Для хлопкового волокна	7 500
Воспламенение древесины:	
через 75 с	18 700
через 25 с	25 910
Нижний предел излучения, достаточный для самовоспламенения древесины любого вида при длительном воздействии	25 100
Самовоспламенение древесины:	
через 75 с	30 890
через 25 с	41 900
Самовоспламенение хлопчатобумажной ткани:	
через 7 с	33 500
через 5 с	41 900
через 3 с	53 400

Таблица XIV

Наименование материалов	Токсичные продукты
1	2
Органическое волокно	Окислы азота, акрилонитрил, окись углерода
Волокно нитрон	Окислы азота
Фторопласт	Фтористый водород, фторфосген
Винилпласт, пластикат	Хлористый водород, окись углерода
Волокно хлорин	Хлористый водород

1	2
Аминопласты (ипорка, мипора)	Синильная кислота
Капрон, анид	Синильная кислота
Пенополиуретан	Синильная кислота, толуиленидиэозионат
Целлулоид	Окислы азота, синильная кислота
Бутадиен - нитрильный каучук	Синильная кислота, окись углерода
Хлоропреновый каучук	Синильная кислота, окись углерода
Полисульфидные каучуки	Хлористый водород, хлормеркаптаны, сернистый газ
Резиновый линолеум (релин)	Сероводород, сернистый газ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы XXV съезда КПСС. М., Политиздат, 1976.
2. Абдурагимов И.М. Огнетушащие средства и способы их применения. Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева, 1976, № 4.
3. Абдурагимов И.М. и др. О повышении эффективности и коэффициента использования огнетушащих составов при тушении пожаров ТГМ. Труды ВИПТШ МВД СССР, 1979.
4. Альтшудль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М., Стройиздат, 1975.
5. Баратов А.Н. Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева, 1974, № 19.
6. Баратов А.Н., Иванов Е.И. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. М., "Химия", 1979.
7. Баратов А.Н. "Новые средства пожаротушения". Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева, 1976, № 4.
8. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. Изд-во АН СССР, М., 1961.
9. Волков Н.П. "Исследование эффективности судовых систем пенотушения в машинных отделениях". Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Л., 1975.
10. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л., "Энергия", 1978.

11. Гуськов М.Г., Гизман М.К. Противопожарная защита морских судов. Л., Судостроение, 1974.
12. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ. М., Изд-во Мин-ва коммун. хоз-ва РСФСР, 1962.
13. Емельянов А.П. "Вязкая вода". Пожарное дело, М., 1975, № 4, с. 23.
14. Зельдович Я.Б., Воеводский В.В. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. Изд. Моск. мех. ин-та, 1947.
15. Зельдович Я.Б. ЖЭТФ 1941, 11, 159; ЖТФ 1949, 19, 10, 1199-1210.
16. Кострюков В.А. Основы гидравлики и аэродинамики. М., "Высшая школа", 1975.
17. Кострюков В.А. Отопление и вентиляция. М., Стройиздат, 1965.
18. Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. Л., "Недра", 1977.
19. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ, М., "Химия", 1979.
20. Михеев В.П., Медников Ю.П. Сжигание природного газа. Л., "Недра", 1975.
21. Мамиконянц Г.М. Тушение пожаров мощных газовых и нефтяных фонтанов. М., "Недра", 1971.
22. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения, Л., "Энергия", 1973.
23. Петров И.И. "Исследование процессов тушения пламени нефтепродуктов в крупных резервуарах воздушно-механической пеной". Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М., 1974.
24. Пожарная тактика. Часть 1. Под ред. И.Ф. Кимстача. М., ВШ МООН СССР, 1967.
25. Пены. Получение и применение. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. М., 1974.
26. Рекомендации по тушению пожаров газовых и нефтяных фонтанов. М., ВНИИПО МВД СССР, 1976.
27. Рекомендации по тушению пожаров спиртов в резервуарах. М., ВНИИПО МВД СССР, 1971.
28. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. М.-Л., ГЭИ, 1959, с. 209.
29. Ставицкий М.Г. Борьба с пожарами на судах. Л., Судостроение, 1976.
30. Стрижевский И.И., Эльнатанов А.И. Факельные установки. М., "Химия", 1979.

31. Сборник обзорных работ по моделированию пожаров. ВНИПО МВД СССР, М., Стройиздат, 1963.
32. Сб. "Пожарная защита судов", 1979, № 10.
33. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М., "Химия", 1975.
34. Указания по тушению пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах. М., ГУПО МВД СССР, ВНИПО МВД СССР, 1973.
35. Хэмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М., "Энергия", 1976.
36. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. М., Стройиздат, 1975.
37. Шаулюв Ю.Х., Лернер М.О. Горение в жидкостных ракетных двигателях. М., Оборонгиз, 1961.
38. Эльнатанов А.И. Обеспечение взрывобезопасности при сжигании и сбросе отходящих газов. ЖВХО им. Д.И. Менделеева, т. XIX, 1974, № 5.
39. Яворский И.А. Физико-химические основы горения ископаемых топлив и графитов. Новосибирск, "Наука", 1973.
40. Perrins L.E., Pettett K. Measurement of flame spread velocities. "J. Fire and Flammabil", 1974, 5. № 1, 3.И. "Пожарная охрана", 1974, № 28.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава 1. Определение пожара как физического явления и его отличительные особенности на современных объектах . . . . .	5
Глава 2. Основы процессов горения на пожаре. Основные понятия и определения . . . . .	10
§ 2.1. Физика и химия процессов горения . . . . .	10
§ 2.2. Структура диффузионных пламен газообразных, жидких и твердых горючих материалов . . . . .	15
§ 2.3. Особенности механизма горения газообразных, жидких и твердых горючих веществ и материалов на пожаре . . . . .	21
Глава 3. Параметры и зоны пожара . . . . .	26
§ 3.1. Параметры пожара . . . . .	26
§ 3.2. Зоны пожара . . . . .	32
Глава 4. Энергетика пожаров . . . . .	39
§ 4.1. Объект пожара как энергетическая система . . . . .	39
§ 4.2. Стационарное горение жидкости в резервуаре (первый частный случай) . . . . .	41
§ 4.3. Нестационарное горение жидкости в резервуаре (второй частный случай) . . . . .	43
§ 4.4. Горение твердых горючих материалов (третий частный случай) . . . . .	46
§ 4.5. Горение неоднородных горючих материалов (четвертый частный случай) . . . . .	48
Глава 5. Общие закономерности развития открытых пожаров . . . . .	51
§ 5.1. Открытые пожары и их отличительные особенности . . . . .	51
§ 5.2. Особенности пожаров на газовых, газонефтяных и нефтяных фонтанах . . . . .	52

§ 5.3. Особенности пожаров в резервуарах с горючими жидкостями . . . . .	63
§ 5.4. Открытые пожары, связанные с горением твердых горючих материалов . . . . .	69
Глава 6. Общие закономерности развития внутренних пожаров . . . . .	74
§ 6.1. Понятие динамики пожаров . . . . .	74
§ 6.2. Тепловой режим пожара . . . . .	80
§ 6.3. Газообмен на внутреннем пожаре . . . . .	90
§ 6.4. Характерные схемы развития некоторых видов пожаров . . . . .	104
§ 6.5. Особенности динамики пожаров на транспорте . . . . .	117
Глава 7. Физико-химические основы механизмов прекращения горения . . . . .	123
§ 7.1. Эффективное тушение пожаров как последняя мера обеспечения пожарной безопасности . . . . .	123
§ 7.2. Тушение пожара как осуществление физического процесса . . . . .	126
§ 7.3. Тепловая теория потухания пламени . . . . .	128
§ 7.4. Физико-химические механизмы прекращения горения пламени . . . . .	136
§ 7.5. Зависимость механизма прекращения горения от режима горения и агрегатного состояния горючих веществ . . . . .	140
Глава 8. Огнетушащие средства и механизмы прекращения горения ими . . . . .	146
§ 8.1. Понятие огнетушащие средства и их классификация . . . . .	146
§ 8.2. Механизм прекращения горения пламени нейтральными газами . . . . .	149
§ 8.3. Механизм прекращения горения пламени химически активными ингибиторами . . . . .	152
§ 8.4. Пены как огнетушащие средства . . . . .	158
§ 8.5. Порошковые огнетушащие средства . . . . .	172
§ 8.6. Вода как огнетушащее средство . . . . .	182
Глава 9. Методы расчета интенсивности подачи огнетушащих средств . . . . .	199
§ 9.1. Расчет удельных расходов, интенсивности подачи и общего количества огнетушащих средств для тушения пожаров . . . . .	199

9.2.	Расчет интенсивности подачи, времени тушения и общего количества огнетушащих средств при тушении негорючими газами и химически активными ингибиторами . . . . .	203
9.3.	Расчет времени тушения и требуемой интенсивности подачи пены при тушении пожаров ЛВЖ, ГЖ . . . . .	208
9.4.	Расчет требуемой интенсивности подачи, удельных расходов воды и времени тушения пожаров ТГМ . . . . .	212
9.5.	Комбинированные огнетушащие средства. Оптимизация способов подачи огнетушащих средств . . . . .	221
	Приложение . . . . .	237
	Литература . . . . .	250

*Носиф Микаэлевич Абдурагимов,  
Вячеслав Юрьевич Говоров,  
Владимир Евгеньевич Макаров*

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

**Учебное пособие**

Редактор *А.А.Симонов* Корректор *Н.О.Классен*  
Технический редактор *К.Т.Городская*

---

Л-48127 Подписано к печати 03.10.80  
Формат бумаги 60×90 1/16 Бумага типогр. №1 Печ.л. 16,0  
Уч.-издл. 14,26 Тираж 2500 экз. Цена 63 коп. Заказ 6007

---

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ  
Люберцы, Октябрьский проспект, 403