

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 из-за снижения температуры в зоне горения и повышения оптической плотности среды. По причине большого задымления среда стала менее прозрачной даже для теплового излучения.

Интенсивность горения медленно снижается, что влечет за собой снижение остальных параметров пожара. Площадь пожара не сокращается, она может расти или стабилизироваться, а площадь горения сокращается. Наступает VII стадия пожара – медленное тление, 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 фазе развития пожара. Автоматические системы тушения пожара должны включаться на I или II фазе его развития, пока пожар не достиг максимальной интенсивности развития. Тушение пожара мобильными 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 развертывание). То есть, оперативно-тактические действия (ОТД), как правило, начинаются на III–IV фазе, а иногда и на V фазе развития пожара, когда его параметры достигли наибольшей интенсивности своего развития или максимального значения, возникла угроза температурных деформаций и обрушения незащищенных металлических конструкций.

1.2. Зоны пожара

Пожар развивается на определенной площади или в объеме и может быть условно разделен на три зоны, не имеющих, однако, четких границ: горения, теплового воздействия и задымления.

Зона горения. Зоной горения называется часть пространства, в котором происходит подготовка горючих веществ к горению (подогрев, испарение, разложение) и их горение. Она включает 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) 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. 1.1.

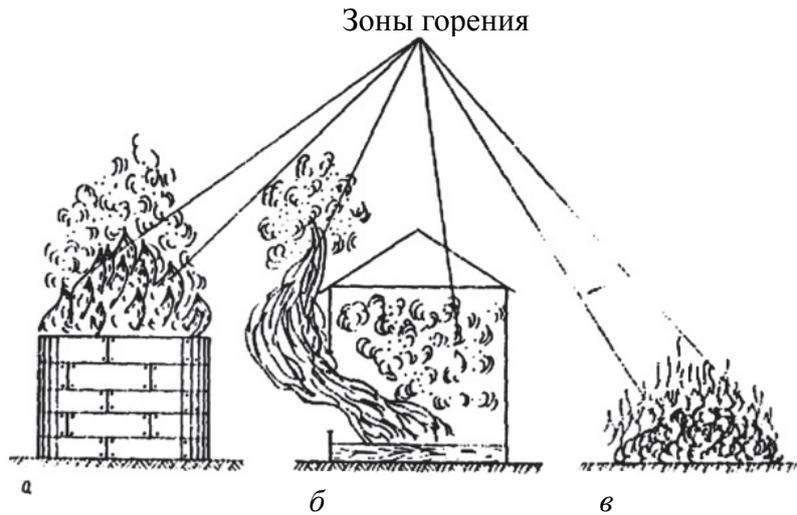


Рис. 1.1. Зоны горения:
а – при горении жидкости в резервуаре; *б* – при горении внутри зданий;
в – при горении угля

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. 1.2.

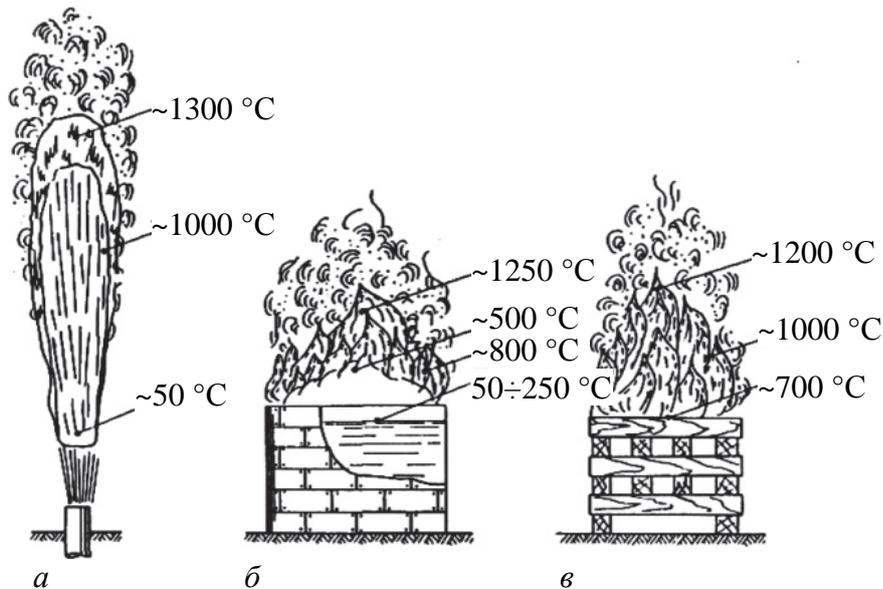


Рис. 1.2. Распределение температур в пламени при горении:
а – газообразных веществ; *б* – жидкостей; *в* – твердых материалов

Зона теплового воздействия. Зоной теплового воздействия называется часть пространства, примыкающая к зоне горения, в котором тепловое воздействие приводит к заметному изменению материалов и конструкций и делает невозможным 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 создаются условия для их воспламенения и дальнейшего 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 потоки горячих газов направлены преимущественно вверх, а количество тепла, переносимое ими в единицу времени, Q_k , пропорционально градиенту температур между газом-теплоносителем и тепловоспринимающей средой, и коэффициенту теплообмена и определяется законом Ньютона:

$$Q_k = a_k (T_r - T_0) F, \quad (1.1)$$

где a_k – коэффициент теплообмена, Вт/(м²К);

T_r – температура в зоне горения, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

F – площадь теплообмена, м².

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

$$Q = \sigma_0 \varepsilon T_r^4 F, \quad (1.2)$$

где σ_0 – коэффициент излучения черного тела, Вт/(м²К⁴);

ε – степень черноты тела;

T_r – температура в зоне горения, К;

F – площадь излучения, м².

Зона теплового воздействия на внутренних пожарах по размерам будет меньше, 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 ликвидации горения на пожарах 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. С учетом температуры 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 действий по тушению.

Учитывая интенсивность лучистого теплового потока, за дальнюю границу зоны теплового воздействия принимают такое удаление от зоны горения, где лучистое тепло, воздействуя на незащищенные части тела человека (лицо, руки), вызывает болевые ощущения не мгновенно, а через промежуток времени, соизмеримый с оперативным временем, т. е. временем, необходимым для активного воздействия пожарного, 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 оснащении участника тушения пожара (например, стволом тонкораспыленной воды, с раствором смачивателя или загустителя) это время условно можно принять равным 15 сек. Тогда, по экспериментальным данным, за дальнюю границу зоны теплового воздействия можно условно принять интенсивность лучистого потока примерно 3 500 Вт/м².

В табл. 1.1. приведены значения интенсивности излучения пламени при горении штабелей древесины на различном расстоянии от них.

Таблица 1.1

Интенсивность излучения пламени при горении штабелей древесины

Высота штабелей, м (ширина 14 м)	Максимальная высота пламени, м	Максимальная температура пламени, °С	Интенсивность излучения пламени, Вт/м ² , на расстоянии			
			10 м	15 м	20 м	25 м
6	8	1 300	13 980	11 890	8 500	4 540
9,5	12	1 300	13 980	12 580	9 070	4 890

При тех же размерах штабеля, но с другим коэффициентом поверхности горения, это расстояние может существенно измениться, тогда высота пламени увеличится или уменьшится за счет изменения площади горения, а, следовательно, и выхода летучих веществ из древесины. Безопасное расстояние $L_{без}$, м при горении штабелей древесины может быть определено по эмпирической формуле:

$$L_{без} = 1,6H, \quad (1.3)$$

где H – общая высота штабеля и пламени, м.

На рис. 1.3 и 1.4 приведены графики, показывающие изменение интенсивности излучения пламени на различных расстояниях от него. Зная допустимые или предельные значения интенсивности излучения, можно найти расстояния, обеспечивающие безопасную работу пожарной техники и личного состава подразделений.

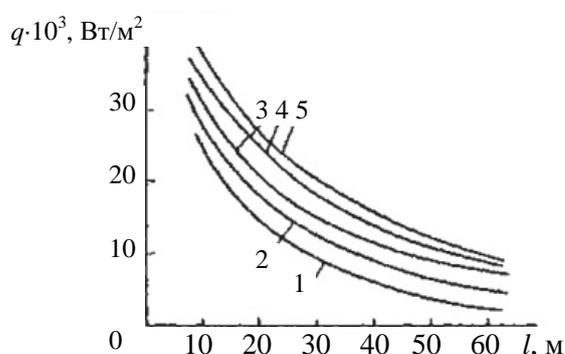


Рис. 1.3. Зависимость интенсивности излучения пламени от расстояния при горении штабелей древесины различной высоты:
1 – 5 м; 2 – 6 м; 3 – 8 м; 4 – 10 м; 5 – 12 м

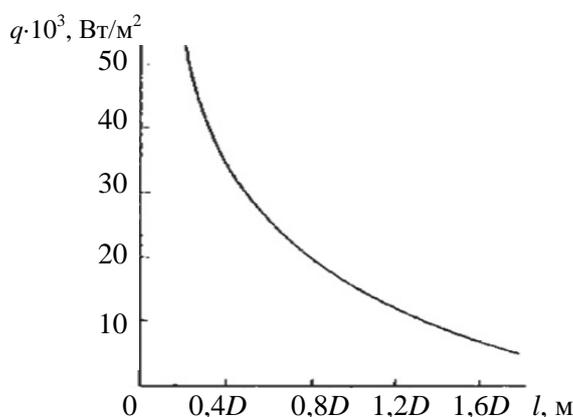


Рис. 1.4. Зависимость интенсивности излучения пламени от расстояния до резервуара с горячей жидкостью (D – диаметр резервуара)

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 на пожаре. 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 потоками, а при наличии мощных конвективных потоков, которые наблюдаются на пожарах, дым разносится на значительные расстояния.

Дым определяется как совокупность газообразных продуктов горения органических материалов, в которых рассеяны небольшие твердые и жидкие частицы. Это определение шире, чем большинство распространенных определений дыма.

Сочетание сильной задымленности и токсичности представляет наибольшую угрозу тем, кто находится в здании, охваченном пожаром. Статистические данные позволяют сделать вывод о том, что более 50 % всех смертельных исходов при пожарах можно отнести за счет того, что люди находились в среде, заполненной дымом и токсичными газами.

Экспериментальным путем установлена зависимость видимости от плотности дыма. Например, если предметы при освещении их групповым фонарем с лампочкой в 21 Вт видны на расстоянии:

- до 3 м (содержание твердых частичек углерода $1,5\text{г}/\text{м}^3$) – дым оптически плотный;
- до 6 м ($0,6\text{--}1,5\text{г}/\text{м}^3$ твердых частичек углерода) – дым средней плотности;
- до 12 м ($0,1\text{--}0,6\text{г}/\text{м}^3$ твердых частичек углерода) – дым оптически слабый.

За редким исключением, дым образуется на всех пожарах. Дым уменьшает видимость, тем самым он может задержать эвакуацию людей, находящихся в помещении, что может привести к воздействию на них продуктов сгорания, причем в течение недопустимо длительного периода времени. При этих обстоятельствах люди могут быть поражены вредными составляющими дыма, даже находясь в местах, удаленных от очага пожара. Влияние пониженного содержания кислорода и вдыхаемых горячих газов становится весьма значительными лишь поблизости от пожара.

Традиционно дым, состоящий из микрочастиц, рассматривается отдельно от газообразных продуктов сгорания, хотя методически это не совсем верно.

Дым, состоящий из мелкодисперсных частиц, образуется в результате неполного сгорания. Он образуется как при беспламенном, так и при пламенном горении, хотя характер частиц и формы их образования весьма различны. Дым при тлении аналогичен тому, который получается, когда любой углеродсодержащий материал нагревается до температур, вызывающих химическое разложение и эволюцию летучих продуктов горения. Фракции с большим молекулярным весом конденсируются по мере их перемешивания с холодным воздухом, что приводит к образованию тумана, состоящего из мельчайших капель смолы и высококипящих жидкостей. Эти капли стремятся в условиях спокойной среды слипаться, образуя мелкие частицы со средним диаметром, порядка одного микрона, и осаждаются на поверхностях, образуя маслянистый остаток.

По своему характеру дым при пламенном сгорании материалов отличается от дыма при тлении. Он состоит почти целиком из твердых частиц. В то время как небольшая часть этих частиц может быть образована при выходе из твердого материала в условиях воздействия на этот материал мощного теплового потока, большая часть частиц образуется в газовой фазе в результате неполного сгорания и высокотемпературных реакций пиролиза при низких концентрациях кислорода. Следует заметить, что дым, состоящий из твердых частиц, может также образоваться, если исходным горючим материалом является газ или жидкость.

В условиях полного сгорания горючее превращается в устойчивые газообразные вещества, но это достигается при пламенном диффузионном горении нечасто. На типичном пожаре перемешивание происходит за счет турбулентных восходящих потоков, в которых наблюдаются значительные перепады концентраций. В областях с низкой концентрацией кислорода часть летучих продуктов может участвовать в ряде реакций пиролиза. В результате этих реакций образуется ряд высокомолекулярных соединений, таких, как полициклические ароматические углеводородные соединения и полиацетилены, которые являются очагом сажи внутри пламени. Именно присутствие в пламени сажи придает диффузионному пламени желтоватое свечение. Эти мельчайшие частицы (10–100 нм в диаметре) могут подвергаться окислению внутри пламени, но при недостаточно высоких температурах и концентрации кислорода они стремятся увеличиться и спекаться, образуя, таким образом, более крупные частицы, которые покидают области высокой температуры пламени в виде дыма.

Важнейшую роль в этом процессе играет химический состав горючего, послужившего основой дымообразования. Немногие чистые горючие вещества горят несветящимся пламенем и не образуют дым. Другие горючие вещества при идентичных условиях образуют значительные выходы частиц дыма в зависимости от их химического состава.

Горючие вещества, насыщенные кислородом, (например, этиловый спирт и ацетон) образуют при сгорании меньше дыма, чем углеводородные соединения, из которых они образуются. Таким образом, в условиях свободного горения насыщенные кислородом горючие вещества, такие как древесина и полиметилметакрилат, образуют существенно меньше дыма, чем углеводородные полимеры, такие, как полиэтилен и полистирол. Из пары последних полимеров полистирол производит при горении намного больше дыма, так как летучие вещества, возникающие при распаде этого полимерного соединения, состоят в основном из стирола и его олигомеров, которые по природе являются ароматическими соединениями.

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

На открытых пожарах дым, как правило, поднимается выше человеческого роста и редко оказывает большое влияние на выполнение ОТД. Положение зоны задымления зависит в основном от размеров площади пожара и метеорологических условий.

Силы, обеспечивающие движение дыма внутри здания, создаются за счет следующих факторов:

- выталкивающей силы, возникающей из-за разностей внутренней и внешней температур окружающей среды;
- выталкивающей силы, обусловленной самим пожаром;
- влияния внешнего ветра и движения воздуха;
- системы регулирования воздуха внутри помещения.

Перепад давления, обусловленный естественными выталкивающими силами.

В высоких зданиях, содержащих вертикальные пространства (лестничные клетки, шахты лифтов и т. д.), перепады внутренней и наружной температур вызовут перепады давления, обусловленные выталкивающей силой, что известно как эффект «дымовой трубы». Если температура внутри здания распределена равномерно и будет выше температуры внешней (температуры окружающей среды), тогда возникнет естественный подсос воздуха самыми нижними слоями и выталкивание самых верхних слоев.

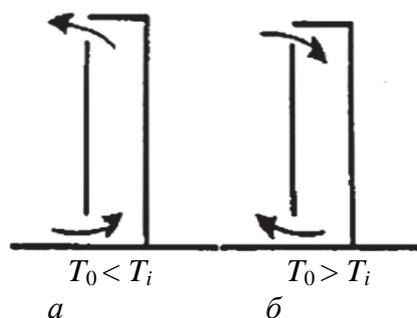


Рис. 1.5. Иллюстрация эффекта «дымовой трубы», сопровождаемого циркуляционными потоками (T_0 – внешняя температура, T_i – внутренняя температура)

В реальных зданиях, конечно, имеется множество небольших щелей утечки воздуха в конструкциях окон и дверей, даже когда они закрыты. Эти небольшие щели образуют как бы распределенные по зданию проемы. Над нейтральной плоскостью воздух (или дым) будет стремиться выйти наружу из воображаемой шахты, в то время как ниже этой плоскости образуется вытекающий поток, который в свою очередь создает восходящее движение внутри шахты (рис. 1.5, *a*). Но, если внешняя температура выше температуры внутри здания, как будет в случае оснащенных кондиционерами зданиях в странах с жарким климатом, тогда возникнет противоположная ситуация (рис. 1.5, *б*). Воздух будет стремиться на дно таких шахт и в случае возникновения пожара, исходное направление дыма может оказаться противоположным по сравнению с тем, что предлагалось.

Благодаря влиянию эффекта «дымовой трубы» может возникнуть весьма мощное движение относительно холодного дыма вокруг здания повышенной этажности, причем этим движением задымленный воздух забрасывается в такие области, в которых появление дыма и не предполагалось (рис. 1.6). Ниже нейтральной плоскости существует тенденция вовлечения задымленного воздуха в центральный ствол, в то время как выше этой плоскости образуется вытекающий поток (сравни рис. 1.5, *a*). Пожар в нижней части здания повышенной этажности может вызвать весьма быструю задымленность в верхних этажах здания.



Рис. 1.6. Влияние эффекта «дымовой трубы» на движение дыма в здании повышенной этажности

Давление, непосредственно формируемое пожаром. Пожар в помещении приводит к повышению температур, что в свою очередь создает выталкивающие силы, приводящие к вытеснению раскаленных газов, образующихся при пожаре, через верхнюю часть всякого вентиляционного проема или через другие подходящие пути утечки газовой смеси.

Перепад давлений в данном случае относительно незначительный, но он может усилить утечку дыма в другие части здания при прочих благоприятных для развития пожара условиях.

Перепады давления, обусловленные ветром. Естественный ветер может вызвать перераспределение давления вокруг оболочки здания, которое будет в состоянии повлиять на движение дыма в здании. Распределение внешнего давления зависит от многочисленных факторов, включая скорость и направление ветра, высоту и геометрию здания.

Вклад этих факторов может оказаться вполне достаточным, чтобы резко ослабить действие прочих сил (как естественных, так и искусственных), которые оказывают влияние на движение дыма. Вообще говоря, обдув здания ветром приведет к высоким значениям давления на наветренной стороне и может вызвать движение воздуха внутри здания в направлении подветренной стороны, где давление ниже.

На распределение давления на поверхности здания сильное влияние оказывают непосредственное примыкание соседних зданий и геометрия самого здания. Общераспространенным случаем является изолированное одноэтажное сооружение, например торговый центр, связанный с многоэтажной башней – административным корпусом. Картина распределения ветра вокруг здания такой геометрии может быть исключительно сложной, распределение давления на поверхности крыши торгового центра будет резко меняться при изменении скорости и направления ветра. Таким образом, размещение и выбор типа устройств естественной вентиляции должны быть основаны на распределении давления, которое следует ожидать на крыше торгового центра. Если при некоторых скоростях и направлениях ветра существует вероятность возникновения относительно высокого давления поблизости от дымового люка, то в таком случае применение естественной вентиляции не будет являться надежным способом удаления дыма из торгового центра.

Перепады давления, вызванные системами приточно-вытяжной вентиляции. Многие современные здания оснащены системами приточно-вытяжной вентиляции для обогрева, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ). При неработающих вентиляторах система воздушных каналов может действовать как система каналов, через которые будет удаляться дым под влиянием сил, рассмотренных выше, включая, в частности, силы, обусловленные эффектом «дымовой трубы» в многоэтажных зданиях. Но, с другой стороны, указанное выше обстоятельство может способствовать распространению дыма по всему зданию, причем этот эффект может проявиться еще сильнее, если система будет функционировать, когда вспыхнет пожар. Можно избежать такой ситуации путем автоматического отключения системы при срабатывании дымовых пожарных извещателей. Возможно и альтернативное решение проблемы за счет другого уровня совершенства системы. Речь идет о том, что систему ОВКВ

можно спроектировать таким образом, чтобы она регулировала отвод дыма из здания, в то же время обеспечивала защиту других помещений и мест, где возможно появление людей, за счет дистанционного управления отсечными клапанами. При таком подходе требуется устройство, обеспечивающее обратный приток воздуха внутри системы, и продуманная система надзора и эксплуатации.

Во время ранних этапов закрытого пожара, когда горение носит местный характер, продукты сгорания будут постепенно разбавляться по мере их подъема в восходящем факеле до того, как он будет деформирован толчком. Раскаленный дым будет затем растекаться в горизонтальном направлении в виде припотолочной струи до тех пор, пока дым не найдет какую-либо щель или отверстие, через которое он мог бы продолжать свое движение вверх или, что более вероятней, до тех пор, пока он не встретится с вертикальной преградой, такой как стена, которая будет препятствовать дальнейшему движению и вызовет разворот слоя дыма и его утолщение, ограниченное потолком и стенами помещения. Скорость нарастания толщины слоя дыма частично будет зависеть от скорости горения, но, главным образом, от объема воздуха, который поступает в факел пожара.

Обычно при вынужденной эвакуации все двери по направлению движения людей остаются открытыми. В результате продукты сгорания и дым беспрепятственно поступают в лестничную клетку, шахты лифтов, лифтовые холлы, вестибюли и другие помещения.

При наличии samozакрывающихся дверей с доводчиками и плотными притворами, выход дыма из коридора, в пределах которого возник пожар, может быть значительно ограничен. Однако и в этом случае, при больших потоках эвакуируемых, двери остаются длительное время открытыми именно в то время, когда продукты сгорания и дым наиболее интенсивно заполняют коридоры, эвакуационные пути и выходы.

Задымление лестничных клеток, шахт лифтов и вестибюлей можно предотвратить введением в действие системы противодымной защиты, обеспечивающей незадымляемость путей эвакуации. Даже при открытых проемах, площадь равных давлений (нейтральная зона) перемещается в сторону этих проемов, и верхние этажи интенсивно задымляются. Задымлению путей эвакуации будет способствовать вынужденное открывание дверных проемов для прокладки рукавных линий пожарными в ходе развертывания сил и средств.

Менее опасная обстановка создается при свободном развитии пожара в замкнутом объеме, при закрытых оконных и дверных проемах до вскрытия остекления и перехода в открытую форму. Тем не менее, при возникновении пожара в нижней зоне здания, задымляются все этажи лестничной клетки, а при длительном развитии пожара дым начинает проникать в межквартирные коридоры и квартиры.

Здание считается незадымляемым, если во всех помещениях, за исключением очага пожара, во время пожара значения его опасных факторов не достигают предельно допустимых, а в межквартирном коридоре этажа, на котором возник пожар, имеется зона, через которую можно эвакуировать людей без специальных средств защиты.

Противодымная защита обеспечивает:

- подпор воздуха в защищаемом от дыма и токсичных продуктов сгорания объеме (лестничной клетке, шахте лифта);
- удаление дыма из коридора этажа, на котором возник пожар;
- приток воздуха из защищаемого объема с избыточным давлением в нижнюю зону коридора этажа, на котором возник пожар.

Незадымляемость горизонтальных путей эвакуации (нижней части коридора) достигается расслоением нагретых продуктов сгорания, которые поднимаются вверх, и поступающего холодного воздуха, занимающего пространство над плоскостью пола высотой слоя около 1,2 м.

Процесс развития пожара при работающей системе противодымной защиты состоит из двух периодов. В I периоде в результате работы системы дымоудаления пожар в горящем помещении развивается так же, как и в замкнутом объеме, а во II периоде после того, как давление в зоне горения становится положительным, он протекает по законам открытых пожаров, но вследствие удаления продуктов сгорания отличается от них.

Система дымоудаления (вытяжка из коридора и подпор в лестничную клетку) при закрытой двери в тамбур-шлюз обеспечивают незадымляемость лестничной клетки. При открывании двери из тамбур-шлюза в коридор, дыма в тамбур-шлюз и лестничную клетку попадает немного, даже при открытом остеклении. До вскрытия остекления происходит опрокидывание тяги в системе естественной вентиляции из-за разрежения, создаваемого системой дымоудаления из коридора, что является положительным фактором, т.к. исключается задымление верхних этажей до вскрытия оконного остекления.

1.3. Основные параметры пожара

К основным параметрам развития пожара относят: продолжительность пожара, площадь пожара, температуру пожара, скорость распространения пожара, скорость выгорания горючих веществ и материалов, интенсивность газообмена, интенсивность или плотность задымления,

Продолжительностью пожара $\tau_{п}$, мин называется время с момента его возникновения до полного прекращения горения.

Площадь пожара $S_{п}$, м² называется площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На рис. 1.7 показаны характерные случаи определения площади пожара.