Практическое занятие № 7
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА И ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Цель занятия. Ознакомится с параметрами пожара, методикой определения характеристик пожарной нагрузки, площади и динамикой развития пожара

1. Общие положения

Знание закономерностей изменения параметров пожара необходимо для обеспечения безопасности людей, разработки мер по предотвращению распространения пожаров, для проектирования систем автоматического обнаружения и тушения, планирования сил и средств, необходимых при ликвидации пожаров.

Непосредственной причиной возникновения процесса горения и, следовательно, пожара является источник зажигания. Им может быть в принципе любой источник тепла достаточной мощности (бытовой кипятильник, рефлектор и т. д.). Во многих случаях пожар начинается с прогрева локального участка поверхности горючего материала и образования над ним горючей смеси, которая затем воспламеняется. Лучистый тепловой поток от образовавшегося факела нагревает соседние участки поверхности, вызывая образование и воспламенение над ними горючей смеси, то есть начинается процесс распространения пламени по поверхности, увеличение площади пожара. С ростом площади пожара увеличивается объем зоны горения и, соответственно, площадь излучения, конвективные потоки. Все это приводит к повышению среднеобъемной температуры и, как следствие, температуры всех предметов и материалов, находящихся в помещении. В свою очередь, рост температуры материалов сопровождается увеличением линейной скорости распространения фронта пламени.

По характеру теплового воздействия на ограждающие конструкции зданий пожары подразделяются *на локальные и объемные*.

Локальные пожары характеризуются слабым тепловым воздействием на ограждения. Они развиваются при избытке воздуха, то есть при превышении теоретически необходимого для горения его количества.

Объемные пожары характеризуются значительными тепловыми воздействиями на ограждающие конструкции. Для объемного пожара, регулируемого вентиляцией, характерно наличие между факелом пламени и ограждающими поверхностями дымовой прослойки, при этом процесс горения происходит при избытке воздуха, сопоставимым с аналогичным параметром для открытых пожаров. Для объемного пожара в помещении, регулируемом пожарной нагрузкой, характерно отсутствие дымовой прослойки между пламенем и ограждением.

Объемные пожары в ограждениях принято называть открытыми пожарами. Пожары, протекающие в помещениях при закрытых дверных и оконных проемах, относят к закрытым пожарам.

Скорость распространения горения представляет собой физическую величину, характеризующую поступательное движение фронта пламени в единицу времени. Она зависит от вида и природы горючих веществ и материалов, от начальной температуры, способности горючего к воспламенению, интенсивности газообмена на пожаре, плотности теплового потока на поверхности веществ и материалов и других факторов.

Под *температурой пожара* в помещениях понимают среднеобъемную температуру газовой среды в помещении, под температурой пожара на открытых пространствах – температуру пламени. Температура пожаров в ограждениях, как правило, ниже, чем на открытых пространствах.

Одним из главных параметров, характеризующих процесс горения, является *тепловая мощность пожара*. Это величина равна по значению теплоте, выделяющейся на пожаре за единицу времени. Она определяется массовой скоростью выгорания материалов и их теплотворными способностями.

1.1. Горение твердых веществ и материалов. Открытые пожары

Большинство пожаров связано с горением твердых горючих материалов (ТГМ) (древесина, целлюлоза, шерсть, полимерные материалы, металлы). Механизм горения ТГМ разнообразнее и сложнее. Большинство ТГМ, как известно, горят в пламенном режиме (гомогенное горение). Образование газообразных горючих веществ связано с разложением ТГМ при нагревании - пиролизом. При пиролизе ТГМ происходит разрыв химических связей в молекулах горючего и образование промежуточных веществ с относительно низкой молекулярной массой. Пламенное горение возможно в том случае, если концентрация горючих продуктов пиролиза лежит в области концентрационных пределов распространения пламени. Непрерывное поступление горючих паров и газов в зону горения поддерживается интенсивным тепловым потоком от пламени к поверхности ТГМ. Имеет значение пространственное расположение поверхности ТГМ по отношению к пламени, так как передача тепла может осуществляться не только лучистым потоком, но и конвекцией и теплопроводностью.

Наиболее распространенным ТГМ является древесина, горение которой сопровождается образованием углеродного остатка.

После выхода летучих продуктов пиролиза и угасания пламени нагретый углеродный остаток поверхности древесины непосредственно вступает в контакт с воздухом, начинается заключительная стадия горения

– «тление» или беспламенное горение – поверхностное окисление твердого материала (гетерогенное горение). Надо отметить, что самоподдерживающееся тлеющее горение характерно не только для древесины, но и для бумаги, целлюлозных тканей, опилок, латексной резины и т. д. Максимальная температура тления целлюлозных материалов 600–750 °С. Скорость распространения тлеющего горения (линейная скорость) составляет 0,01 мм/с.

Характерным параметром горения ТГМ является массовая скорость выгорания.

Характер горения металлов во многом определяется значениями температур плавления и кипения самого металла и образующейся окиси, которая создает пленку на поверхности горящего материала. Горение металлов, как правило, наблюдается в том случае, если они находятся в виде стружки, порошков, аэрозолей.

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.

На этих пожарах горение происходит в естественных условиях, не ограниченных строительными конструкциями. За температуру таких пожаров принимают температуру пламени. Газообмен в большой степени зависит от внешних естественных газовых потоков: интенсивности и направления ветра.

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

1.2. Динамика внутренних пожаров

Динамикой любого процесса, в том числе пожара, называется зависимость его параметров от времени.

Если помещение имеет большой свободный объем (обычно более 1000 м^3) или большие открытые проемы, процесс распространения пожара протекает путем постепенного охвата пламенем предметов (изделий, материалов) одного за другим. В помещениях меньшего объема при достижении среднеобъемной температуры 300–350 °С и наличии воздуха содержание газообразных продуктов пиролиза достигает нижнего концентрационного предела распространения пламени. В этом случае скорость распространения пламени достигает максимального значения, поскольку процесс происходит уже не по поверхности, а по объему газовой среды. Скорость распространения пламени по газу составляет

от нескольких метров до сотен метров в секунду в зависимости от состава газа. Внешне это воспринимается как объемная вспышка, то есть одновременное воспламенение всех горючих материалов, которые находятся в помещении. В результате свободный объем помещения превращается в зону горения (объемный пожар). Обычно это сопровождается разрушением остекления проемов вследствие резкого нарастания давления. Соответственно в помещение начинает поступать свежий воздух.

Если свободный объем помещения мал, то при объемном пожаре быстро расходуется запас кислорода, массовая скорость выгорания и, соответственно, интенсивность тепловыделения начинают постепенно уменьшаться. Температура также снижается. В герметичном помещении может произойти самопроизвольное затухание пожара. Однако на практике это бывает редко. Как правило, всегда есть приток воздуха через неплотно закрытые проемы, щели, а температура газовой среды в помещении успевает достичь температуры воспламенения горючих материалов. Поэтому через какое-то время, в зависимости от скорости притока воздуха, в помещении создается горючая смесь продуктов пиролиза с воздухом и горение интенсифицируется.

Если во время «затухания» обеспечить доступ воздуха в помещение (например, открыв дверь), произойдет мгновенное образование и воспламенение горючей смеси. А поскольку объем продуктов сгорания больше объема исходной смеси, в помещении резко возрастет давление и произойдет выброс нагретых газов. Такая вспышка может быть причиной травмирования или гибели пожарных при тушении пожаров в подвалах, банях-саунах, гаражах, холодильниках. Данная стадия пожара, в течение которой продолжается распространение фронта пламени, называется начальной.

После того как рост площади пожара в данном помещении прекращается, начинается вторая стадия – стадия развития, во время которой, при наличии достаточного притока воздуха, увеличивается скорость выгорания горючих веществ, теплота пожара, растет температура газовой среды. В конце этой стадии прекращается изменение параметров процессов тепло- и газообмена, температура достигает максимального значения и начинается третья стадия пожара – стационарная. При свободном развитии пожара горючие материалы постепенно выгорают, и пожар переходит в стадию затухания.

2. Определение характеристик пожарной нагрузки [14]

Пожарная нагрузка это количество теплоты, которое может выделиться в помещение при пожаре.

Собственно *пожарной нагрузкой* $P_{пн}$ называется масса горючих веществ и материалов, приходящаяся на единицу площади их размещения (кг/м^2):

$$P_{пн} = m / F_{пола}, \quad (1)$$

Степень доступности поверхности горючего для окислителя характеризуется *коэффициентом поверхности*. Он равен отношению площади поверхности горения $F_{пг}$ к площади пожара $F_п$:

$$K_п = F_{пг} / F_п. \quad (2)$$

Массовая скорость выгорания $v_м$ (кг/с) представляет собой массу вещества или материала Δm, сгорающего в единицу времени:

$$v_м = \Delta m / \Delta\tau. \quad (3)$$

Приведенная массовая скорость выгорания $v'_м$ (кг/с·м^2) определяется по формуле $v'_м = v_м / F_п$.

Отношение $v_м / F_{пг}$ представляет собой *удельную массовую скорость выгорания* и обозначается $v_м$.

Интенсивность тепловыделения (*теплота пожара*) $q_п$, кВт, показывает, какое количество тепла выделяется при горении пожарной нагрузки в единицу времени и определяется выражением:

$$q_п = \beta v_м Q_н, \quad (4)$$

где β – коэффициент полноты сгорания; $v_м$ – массовая скорость выгорания, кг/с; $Q_н$ – низшая теплота сгорания, кДж/кг.

Пример

Определить параметры пожарной нагрузки для помещения площадью 10 м^2, в котором находится штабель древесины. Штабель выложен из 36 брусков, размером 1 х 0,1х 0,1 м шириной в 9 рядов. При данных условиях за 20 мин выгорает 20 % его массы. Плотность древесины принять равной 500 кг/м^3, коэффициент полноты сгорания – 0,9. Элементный состав древесины: C = 40 %, H = 4 %, N = 16 %, O = 10 %, влага (W) –15 %, остальное – зола. Строительные конструкции выполнены из несгораемых материалов.

Решение

1. Пожарная нагрузка в данном случае состоит только из штабеля, так как строительные конструкции являются негорючими. Суммарная масса всех брусков равна:

$$(1 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}1) \cdot 36 \cdot 500 = 180 \text{ кг}.$$

Следовательно, $P_{пн}$ = 180/10 = 18 кг/м^2.

2. Для расчета $K_п$ необходимо сначала вычислить $F_{пг}$, учитывая, что поверхность брусков в местах их пересечений друг с другом гореть не будет.

Введем обозначения: *N* – число брусков в штабеле; a, b и L – ширина, толщина и длина бруска соответственно; *n* – число рядов.

В нашем случае *a* = *b*. Поэтому общая площадь поверхности всех брусков равна 9aL + 2(4aL) + 2(36a^2), площадь одного пересечения – a^2.

Таким образом, для штабеля, выложенного из брусков:

$$F_{пг} = 9aL + 2(4aL) + 2(36a^2) = 0{,}9 + 0{,}8 + 0{,}72 = 2{,}42. \qquad (5)$$

Площадь пожара, по определению, равна площади проекции зоны горения на горизонтальную (в данном случае) плоскость, то есть

$$F_п = a \cdot N \cdot L.$$

Подставим соответствующие значения в формулу и получим:

$$K_п = F_{пг} / F_п = 2{,}42 : 0{,}4 = 6{,}05.$$

3. Находим массовую скорость выгорания. Масса штабеля составляет 180 кг. За 20 мин выгорает 20 % его массы: 0,2 ·180 = 36 кг.

Следовательно:

$$v_м = 36 : 20 = 1{,}8 \text{ кг/мин, или } 0{,}03 \text{ кг/с.}$$

Приведенная массовая скорость выгорания:

$$v'_м = 1{,}8 : 0{,}4 = 4{,}5 \text{ кг/мин·м}^2, \text{ или } 0{,}08 \text{ кг/с·м}^2.$$

Удельная массовая скорость выгорания:

$$v_м = 1{,}8 : 2{,}42 = 0{,}74 \text{ кг/мин·м}^2, \text{ или } 0{,}01 \text{ кг/с·м}^2.$$

4. Определяем интенсивность тепловыделения. Для этого сначала рассчитаем $Q_н$. Так как древесина является веществом сложного состава, расчет ведем по формуле:

$$Q_н = 339 \cdot C + 1256 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 25{,}1 \cdot (9 \cdot H + W) =$$
$$= 339 \cdot 40 + 1256 \cdot 4 - 109 \cdot (10 - 0) - 25{,}1 \cdot (9 \cdot 4 + 15) = 16213{,}9 \text{ кДж/кг}$$

Подставив полученное значение в формулу для определения $q_п$ и выразив $v_м$ в кг/с, получим $q_п$ = 0,9·0,03 ·16213,9 = 437,8 кВт.

Ответ: $P_{пн}$ = 18 кг/м^2; $K_п$ = 6,05; $v_м$ = 0,03 кг/с; $v'_м$ = 0,08 кг/с·м^2; $v_м$ = 0,01 кг/с·м^2; $q_п$ = 437,8 кВт.

3. Расчет площади и построение графика развития пожара

При расчете площади пожара принимается ряд допущений:

1) пожарная нагрузка в помещении распределена равномерно по всей площади пола. Это означает, что распространение фронта пламени происходит непрерывно;

2) фронт пламени распространяется обязательно во все стороны и с одинаковой скоростью. Следовательно, площадь пожара может иметь только форму круга, полукруга, четверти круга, сектора, прямоугольника или квадрата;

3) в первые 10 минут свободного развития пожара линейная скорость распространения фронта пламени $v_л$ равна половине значения. То есть при $\tau \leq 10$ мин $v_л = 0{,}5v_л$; при $\tau > 10$ мин $v_л = v_л$.

4) когда фронт пламени достигает ограждающей конструкции, его форма сразу становится прямоугольной.

Таким образом, площадь пожара $F_п$ рассчитывается по следующим основным формулам (рис. 1).

Рис. 1. Форма площади пожара (● – место возникновения пожара)

Учитывая, что в начальной стадии развития пожара (длительность которой принимается равной 10 мин) $v_л = 0{,}5v_л$(м/мин), путь, пройденный фронтом пламени к моменту τ, будет равен:

$$L_\tau = 0{,}5v_л \cdot \tau \text{ при } \tau \leq 10 \text{ мин;} \quad (6)$$

$$L_\tau = L_{10} + L_{\tau-10} = 5v_л + v_л(\tau - 10) \text{ при } \tau > 10 \text{ мин.} \quad (7)$$

Здесь L_{10} – путь, который проходит фронт пламени за первые 10 мин; $L_{10} = 0{,}5v_л \cdot 10 = 5v_л$, м; $L_{\tau-10}$ – путь, который проходит фронт пламени за оставшееся после 10 мин время $(\tau - 10)$: $L_{\tau-10} = v_л(\tau - 10)$, м.

Расчет площади пожара на заданный момент времени целесообразно проводить в следующей последовательности:

– найти L_τ;

– по плану помещения установить, где будет находиться фронт пламени;

– учитывая, что при достижении ограждающих конструкций фронт пламени спрямляется, определить форму полученной геометрической фигуры;

– найти площадь пожара.

Графиком развития пожара называется зависимость его площади от времени $F_п = f(\tau)$. Его необходимо построить для моментов времени, указанных в задании.

Пример

Рассчитать площадь пожара на 5-й, 15-й и 20-й минутах с момента его возникновения (рис. 2), если скорость распространения равна 1,2 м/мин, а предел огнестойкости двери – 0,2 ч.

Рисунок 2. План помещения (● – место возникновения пожара)

Решение

1. Поскольку пожар возник возле двери, отсчет предела ее огнестойкости начнется сразу. Тогда в правое помещение пламя проникнет черед $0{,}2 \cdot 60 = 12$ мин с момента возникновения пожара. До 12-й минуты пожар будет распространяться только в одном помещении.

2. За 5 минут фронт пламени пройдет расстояние $L_5 = 0{,}5 \cdot 1{,}2 \cdot 5 = 3$ м. До ближайших боковых стен – 8 м. Следовательно, фронт пламени на 5-й минуте будет иметь форму полукруга и $F_п^5 = 3{,}14 \cdot 3^2/2 = 14$ м^2 (рис. 3).

Рисунок 3. План развития пожара

3. За 15 минут фронт пламени может пройти расстояние:

$$L_{15} = 5 \cdot 1{,}2 + 1{,}2\,(15–10) = 12 \text{ м}.$$

К этому времени в левом помещении он уже достигнет боковых стен и примет форму прямоугольника размером 16 х12 м площадью 192 м^2.

В смежном помещении он будет распространяться всего 15–12 = 3 мин (причем скорость его равна $v_л$, так как τ > 10 мин).

За это время он пройдет расстояние 1,2 · 3 = 3,6 м.

Следовательно, в смежном помещении фронт пламени имеет форму полукруга и площадь, равную $\pi \cdot 3{,}6^2 / 2 = 20$ м^2.

Общая площадь пожара на 15-й минуте:

$$F_п^{15} = 16 \cdot 12 + 20 = 212 \text{ м}^2.$$

4. К 20-й минуте фронт пламени может пройти $L_{20} = 5 \cdot 1{,}2 + 1{,}2 \cdot (20 - 10) = 18$ м. Тогда все левое помещение к этому моменту времени будет охвачено пожаром (см. рис. 3). Однако в правом помещении он будет распространяться 20–12 = 8 мин. За это время он пройдет 1,2 · 8 = 9,6 м и, достигнув боковых стен, примет форму прямоугольника размером 16х9,6 м. В результате:

$$F_п^{20} = 16 \cdot 18 + 16 \cdot 9{,}6 = 441 \text{ м}^2.$$

Таким образом, $F_п^5$ = 14 м^2; $F_п^{15}$ = 212 м^2; $F_п^{20}$ = 441 м^2. По этим данным строим зависимость $F_п = f(\tau)$, которая называется графиком развития пожара.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. Определить параметры пожарной нагрузки (табл. 1) для помещения площадью S, в котором находится штабель древесины. Штабель выложен из N брусков размером 1х0,05х0,05 м в n рядов. Время горения равно τ, степень выгорания Δm. Плотность древесины принять равной 500 кг/м^3, коэффициент полноты сгорания 0,9.

Элементный состав древесины: C = 51 %, H = 6 %, N = 20 %, O = 13 %, влага – 10 %. Строительные конструкции выполнены из несгораемых материалов.

Таблица 1

Исходные данные для определения параметров пожарной нагрузки

Номер варианта	S, м^2	N	n	τ, мин	Δm, %
1	15	45	9	25	37
2	13	36	9	20	40
3	20	45	9	15	22
4	23	40	8	15	25
5	14	30	6	10	22
6	18	32	8	10	20

Окончание табл. 1

Номер варианта	S, м^2	N	n	τ, мин	Δm, %
7	21	40	10	15	25
8	17	25	5	10	27
9	10	24	6	10	28
10	12	40	8	20	34
11	16	30	7	20	25
12	19	35	10	15	30
13	20	45	8	10	40
14	12	22	12	22	22
15	22	30	6	15	27
16	14	36	9	18	23
17	17	35	7	25	20
18	19	24	5	15	30
19	20	20	10	18	22
20	17	35	15	21	37

2.Определить площадь пожара в помещении (рис. 4) на заданные моменты времени: 7, 15, 20, 25 и 30 мин. Построить план и график развития пожара.

Рис. 4. План помещения
(○ – место возникновения пожара)

Таблица 2

Исходные данные для определения площади пожара

Номер варианта	Место возникновения пожара	Масштабный коэффициент а, м	Предел огне-стойкости дверей,ч	Линейная скорость распространения пламени, м/мин
1	9	10	0,2	0,6
2	7	8	0,1	1
3	5	6	0,2	0,6
4	3	10	0,1	1,2
5	1	8	0,1	0,8
6	2	6	0,3	0,6
7	4	8	0,2	1,2
8	6	8	0,2	1
9	8	10	0,1	1,4
10	10	8	0,2	1,2
11	9	8	0,1	0,6
12	7	10	0,1	1
13	5	8	0,2	0,6
14	3	8	0,3	1,2
15	1	6	0,2	0,8
16	2	8	0,1	0,6
17	4	10	0,2	1,2
18	6	6	0,1	1
19	8	8	0,3	1,4
20	10	10	0,2	1,2