

Д.А.  
ПЧБ

ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
СБОРНИК

Пожарная

ПРОФИЛАКТИКА  
И ПОЖАРОТУШЕНИЕ

вып. 1

МОСКВА-1964

10.1  
П46

# ПОЖАРНАЯ ПРОФИЛАКТИКА И ПОЖАРОТУШЕНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

*Выпуск первый*



ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ  
«СТРОЙИЗДАТ»

---

Москва — 1964

7494

~

В сборнике освещаются вопросы горения твердых и жидких веществ, определения пределов взрываемости паро- и газозодушных смесей, исследования пожаров, нормирования эвакуации людей из зданий, классификации причин пожаров, связанных с печным отоплением, а также расчета интенсивности подачи воды при тушении пожара.

Сборник рассчитан на инженерно-технических работников пожарной охраны и учащихся пожарнотехнических учебных заведений.

Докт. физ.-мат. наук, проф. В. И. БЛИНОВ,  
инженеры В. Ч. РЕУТТ и В. Е. АНИСИМОВ

## ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

За последнее десятилетие получено много данных о скорости сгорания жидкостей в резервуарах при различных условиях [1], которые дают более или менее ясное представление о процессе горения жидкостей. Не менее важным является и процесс тушения пламени жидкостей, а также связанное с этим изменение скорости горения с понижением температуры на поверхности горячей жидкости. Это явление совсем не изучено. Настоящая статья в некоторой мере восполняет указанный пробел.

Для выяснения зависимости скорости горения жидкости от температуры на ее поверхности были проведены специальные экспериментальные исследования.

В первой серии опытов применялись стеклянные горелки с внутренним диаметром 5; 10 и 23 мм. В горелках сжигались этиловый и бутиловый спирты, бензин и керосин. Уровень горячей жидкости поддерживался стабильным, но при проведении каждого опыта изменялся. При каждом положении уровня измерялась температура на поверхности жидкости и высота пламени, а иногда и скорость сгорания жидкости.

На рис. 1 показаны результаты опытов с бензином, сгоравшим в горелке диаметром 10,2 мм. Здесь по оси абсцисс отложено расстояние  $h$  от поверхности жидкости до среза горелки, а по оси ординат — температура  $t$  на поверхности бензина и высота пла-

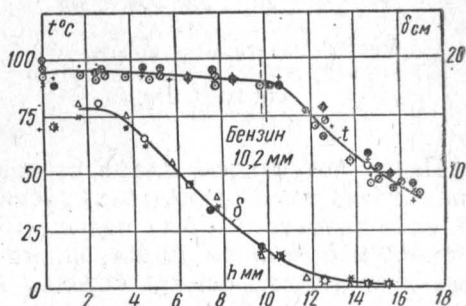


Рис. 1. Зависимость температуры на поверхности бензина и высоты пламени от расстояния между поверхностью жидкости и срезом горелки.



мени  $\delta$  в см. Значками обозначены опытные данные, полученные в разные дни.

Аналогичная картина наблюдалась при горении и других жидкостей. Из рисунка видно также, что при понижении уровня жидкости в горелке уменьшалась высота пламени. При некотором значении  $h$ , различном для разных горелок и жидкостей, пламя гасло. Эту предельную величину мы в последующем будем называть критической и обозначать через  $h_k$ .

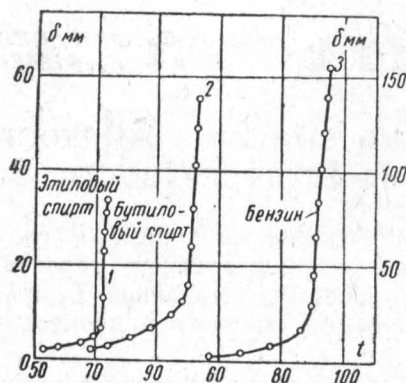


Рис. 2. Зависимость высоты пламени от температуры на поверхности жидкости.

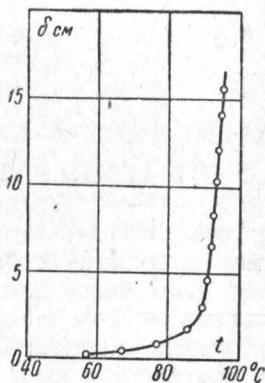


Рис. 3. Зависимость высоты пламени от температуры на поверхности жидкости.

Перед потуханием пламя становилось плоским и слабо светилось. Оно имело вид диска, расположенного выше среза горелки, если диаметр  $d$  был меньше 10 мм. В тех же случаях, когда диаметр  $d$  превышал 10 мм, пламя перед потуханием наклонялось и опускалось внутрь горелки и тем более, чем больше был диаметр последней. При  $d = 10,2$  мм пламя опускалось, примерно, на 2 мм.

На рис. 2 и 3 приведена зависимость высоты пламени от температуры на поверхности жидкости, полученная при проведении описываемых опытов. Так как высота пламени пропорциональна скорости  $v$  сгорания [1], то ход кривых  $\delta(t)$  дает представление о том, как с изменением температуры изменяется скорость выгорания жидкости в горелках.

Из приведенных рисунков видно, что с понижением температуры на поверхности высота пламени быстро уменьшается. В этом случае связь между  $\delta$  и  $t$  может быть записана в виде:

$$\delta = m + kt, \quad (1)$$

где  $\delta$  — высота пламени в см;

$t$  — температура поверхности;

$m$  — коэффициент;

$k$  — коэффициент, характеризующий быстроту понижения высоты пламени.

При диаметре горелки 10,2 мм значения этого коэффициента следующие:

для авиационного бензина . . . . .	23,6 мм/град
для бутилового спирта . . . . .	14,3 "
для этилового спирта . . . . .	20,0 "
для керосина . . . . .	13,3 "

Для более низких температур зависимость  $\delta(t)$  выражается соотношением:

$$\delta = \delta_0 e^{-\frac{W}{RT}}, \quad (2)$$

где  $T$  — абсолютная температура поверхности жидкости;

$W$  — коэффициент, пропорциональный молярной теплоте испарения;

$R$  — газовая постоянная.

Оказалось, что численное значение величины  $W$ , определенное на основе опытных данных, в ряде случаев близко к значениям молярной теплоты испарения  $Q$  соответствующих жидкостей, но всегда  $W > Q$ . Это хорошо подтверждают данные следующей таблицы.

Жидкость	$W$	$Q$
Бензин . . . . .	14 000	8 300
Керосин . . . . .	12 600	10 800
Этиловый спирт . . .	10 700	9 500
Бутиловый спирт . . .	11 900	10 500

Тот факт, что один участок кривой  $\delta(t)$  выражен соотношением (1), а другой — формулой (2), резко отличающейся от уравнения (1), говорит о том, что в этих двух областях преобладающее значение имеют различные факторы.

Быстрое понижение скорости выгорания жидкости в том случае, когда справедливо соотношение (1), обусловлено, по-видимому, уменьшением количества тепла, поступающего к жидкости от стенки и от пламени. Скорость  $v$  в этих случаях определяется, в основном, не температурой  $t$ , а количеством тепла, которое подводится к жидкости в единицу времени. Подобная картина наблюдается при горении жидкости в горелках различных диаметров. Как известно [1], температура на поверхности жидкости, сгорающей в полных горелках, всегда близка к температуре кипения и от диаметра  $d$  практически не зависит, а скорость существенно изменяется при изменении  $d$ . Это можно объяснить только тем, что скорость сгорания жидкости в полных горелках определяется количеством тепла, получаемого жидкостью в единицу времени. Изменение скорости сгорания при понижении уровня в рассматриваемой области оказывается сходным с изменением

скорости  $v$  при увеличении диаметра горелок (если горение ламинарное).

В той области изменения  $h$ , где зависимость  $\delta(t)$  выражается формулой (2), скорость горения пропорциональна, в первом приближении, упругости пара у поверхности горящей жидкости и, по-видимому, лимитируется скоростью подвода пара к зоне горения. Но скорости  $v$ , вычисленные на основании закона Фика, оказались в несколько раз меньше наблюдавшихся. Это говорит о том, что при диффузии пара значительную роль играют молярные потоки. Соотношение (2) дает основание предполагать, что последние тем сильнее, чем больше упругость пара у поверхности горящей жидкости. Пламя гасло тогда, когда скорость подвода пара к зоне горения оказывалась недостаточной или, иначе, теплотери в пламени превышали теплоприход, определяемый скоростью сгорания жидкости.

Г. Н. Худяков, изучая горение в стальных горелках бензина, керосина (тракторного и осветительного), дизельного топлива, трансформаторного и солярового масла, установил эмпирическую зависимость между  $h_k$  и диаметром горелки [1]. Оказалось, что в тех случаях, когда  $d < 10$  мм, эта зависимость может быть выражена формулой:

$$h_k = k d^{0,63}, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент, различный для разных жидкостей.

Величина  $k$  тем больше, чем ниже температура кипения соответствующей жидкости.

Если  $d > 10$  мм, то связь между  $h_k$  и  $d$  выражается соотношением:

$$h_k = b d^{1,7}, \quad (4)$$

где коэффициент  $b$  одинаков для всех изученных жидкостей и равен 0,055.

Результаты опытов, проведенных нами, показали, что при горении бензина в стеклянных горелках с диаметром  $d \leq 10$  мм  $h_k \approx d^{0,6}$  и, примерно, в два раза меньше соответственной величины для стальных горелок. Это указывает на то, что величина  $h_k$  зависит не только от природы жидкости, но и от материала, из которого изготовлена горелка.

Опытные данные, имеющиеся в литературе [2], и результаты, полученные нами, показали, что для этилового спирта, сгорающего в стеклянных горелках с диаметром, не превышающим 10 мм, зависимость  $h_k$  от  $d$  следующая:

$$h_k = k' d^{0,36}. \quad (5)$$

Только что рассмотренные эмпирические закономерности могут быть объяснены следующим образом.

Уже отмечалось, что пламя вблизи точки потухания при использовании горелок с диаметром, не превышающим 10 мм, все

время находится выше среза горелки. Если же  $d > 10$  мм, то при приближении к температуре потухания происходит опускание (проскок) пламени в горелку и глубина погружения тем больше, чем больше диаметр горелки. Поэтому вполне естественно, что связь между  $h_k$  и диаметром при  $d \leq 10$  мм описывается одним, а при  $d > 10$  мм — другим соотношением.

Пламя вблизи точки потухания имеет, как указывалось выше, форму горизонтально расположенного диска (если  $d \leq 10$  мм), плавающего над срезом горелки и имеющего диаметр, который немного меньше диаметра горелки. Пламя слабо светится и имеет голубую окраску. Частичек сажи в пламени нет даже в том случае, когда горит жидкость, которая при нормальных условиях дает много сажи. Естественно предположить, что в рассматриваемых условиях потеря тепла пламенем происходит, в основном, благодаря конвекции. Но при передаче тепла от нагретой горизонтальной поверхности [3]:

$$Ni = C(Ra)^n, \quad (6)$$

где  $Ni$  — критерий Нуссельта;

$Ra$  — критерий Рэлея;

Коэффициент  $C$  и показатель степени  $n$  имеют значения, неодинаковые для разных областей: если  $0,001 \leq Ra \leq 500$ , то  $n = 1/8$ , а в том случае, когда  $500 \leq Ra \leq 2 \times 10^7$ ,  $n = 1/4$ . Если в рассматриваемых нами случаях температуру пламени принять равной  $1000^\circ\text{C}$ , средний диаметр пламени — 6 мм, то величина критерия  $Ra$  будет равна 900. Это значение  $Ra$  лежит близко к границе двух областей со значениями показателей степени  $1/8$  и  $1/4$ .

Опыт показывает, что вблизи температуры потухания массовая скорость жидкости:

$$W = \varepsilon D \frac{c_0}{h}, \quad (7)$$

где  $c_0$  — концентрация пара у поверхности жидкости;

$D$  — коэффициент диффузии пара;

$\varepsilon$  — коэффициент, численное значение которого заключено в пределах от 2 до 3.

Таким образом, количество тепла, выделяющегося на единицу поверхности пламени:

$$q = Wq_0,$$

где  $q_0$  — теплота сгорания пара.

Используя формулы (6) и (7), получим:

$$\alpha \Delta t = c \lambda \Delta v \frac{Ra^n}{d} = Wq_0 = v \rho q_0 D \frac{c_0}{h} \varepsilon, \quad (8)$$

где  $\Delta t$  — разность температур пламени и воздуха;

$v \rho$  — соответственно объемная удельная скорость горения и плотность жидкости.

Если учесть, что  $Ra \sim d^3$ , то из уравнения (8) найдем, что

$$h_k = B d^{1-3n}. \quad (9)$$

Величину  $B$  можно считать постоянной, разной для разных жидкостей.

Приняв  $n = 1/8$ , будем иметь:

$$h_k = B d^{5/8}.$$

Это соотношение практически одинаково с уравнением (3).

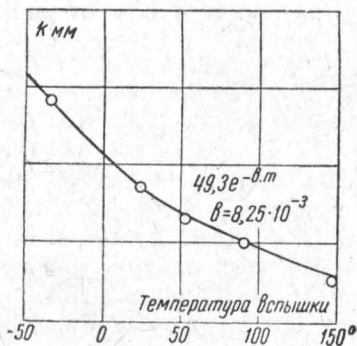


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k$  от температуры вспышки.

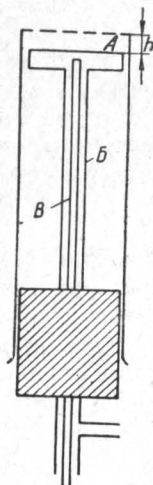


Рис. 5. Схема кварцевой горелки.

Если  $n = 1/4$ , от  $h_k = d^{1/4}$ . Показатель степени 0,36 находится между  $1/4$  и  $5/8$ . Появление его можно объяснить тем, что соответственные значения  $Ra$  лежат вблизи границы двух указанных выше областей.

Если построить зависимость между коэффициентом  $k$ , взятым из данных Г. Н. Худякова, и температурой вспышки соответствующих жидкостей, то получается плавная кривая, приведенная на рис. 4. Она хорошо описывается соотношением:

$$k = 49,3 \exp(-8,25 \times 10^{-3} T).$$

Во второй серии экспериментов использовалась кварцевая горелка с диаметром 29,5 мм. В горелке находился короткий полый медный цилиндр  $A$  (рис. 5), через нижнее основание которого проходили трубки  $B$  и  $B$ . По одной из трубок в цилиндр поступала, а по второй из цилиндра вытекала вода. Между цилиндром и стенкой горелки имелся небольшой кольцевой зазор, через который подавалась горючая жидкость. Расстояние  $h$  между поверхностью жидкости и верхним основанием цилиндра менялось



ст опыта к опыту. При уменьшении  $h$  температура на поверхности горячей жидкости становилась ниже. Опыты были проведены с керосином, авиационным бензином и толуолом. Расстояние менялось от 20 до 0,5 мм. Следует отметить, что горение имело место даже в том случае, когда толщина слоя жидкости над цилиндром равнялась 1 мм, и прекращалось лишь тогда, когда величина  $h$  составляла несколько десятых долей миллиметра.

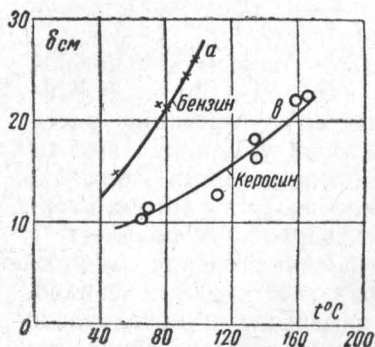


Рис. 6. Зависимость высоты пламени при горении толуола и керосина в кварцевой горелке от температуры на поверхности жидкости.

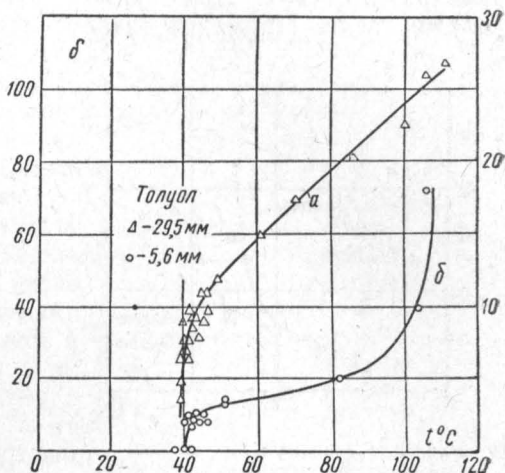


Рис. 7. Зависимость высоты пламени при горении толуола в горелках диаметром 29,5 и 5,6 мм от температуры на поверхности жидкости.

Результаты опытов приведены на рис. 6 и 7 (кривая «а»), на которых по оси абсцисс отложена температура на поверхности жидкости, а по оси ординат — высота пламени, которая, как уже отмечалось, пропорциональна скорости горения.

Из рисунков видно, что высота пламени  $\delta$  плавно уменьшалась с понижением температуры. Оказалось, что и в этом случае зависимость  $\delta(t)$  выражается соотношением (2), величина  $W$  в котором равна 2600—2900.

Вблизи температуры потухания наблюдалось уменьшение  $\delta^*$ . Вид зависимости  $\delta(t)$  в этой области ясно говорит о том, что потухание пламени происходит в результате кризиса горения, т. е. преобладания теплопотерь над теплоприходом.

В третьей серии экспериментов использовались горелки с одинаковым внутренним диаметром (5,6 мм), изготовленные из различного материала. Применялись горелки: стеклянная с толщиной

\* Для получения этой зависимости диск располагался на расстоянии 1 мм от поверхности жидкости. При горении жидкость в горелку не добавлялась. Периодически через малые промежутки времени измерялись величины  $\delta$  и  $t$ .



стенки 0,7 мм; стальная, стенка которой имела толщину 0,6 мм и две латунные трубки, из которых одна имела стенку с толщиной 1 мм, а другая — 3,2 мм. На последней горелке имелся холодильник, через который можно было пропускать воду.

Опыты велись с изоамиловым и бутиловым спиртами и толуолом.

Жидкость в латунной трубке с толстыми стенками воспламенялась с трудом. При дополнительном охлаждении этой трубки пламя гасло. Применяя такое охлаждение, можно было устано-

вить изменение высоты пламени в зависимости от  $t$  вблизи температуры потухания. Перед потуханием пламя было плоским и слабо светилось.

Результаты опытов приведены на рис. 7 (кривая «б») и 8. Обращает на себя внимание здесь очень быстрое убывание высоты пламени при температуре, близкой к точке кипения. Эта картина сходна с той, которая наблюдалась в случае понижения уровня жидкости в трубках. И здесь, очевидно, быстрое изменение  $\delta$  обусловлено уменьшением количества тепла, поступающего к жидкости.

За областью с очень быстрым понижением высоты пламени сле-

дует область, где  $\delta$  меняется сравнительно медленно при понижении  $t$  и в которой зависимость  $\delta$  от  $t$  описывается соотношением (2). Величина  $W$  для изоамилового спирта оказалась равной 9500 кал/моль (теплота испарения этого спирта — 10 500), а для толуола — 7000 (теплота испарения толуола равна 7700).

При понижении температуры на поверхности жидкости происходили существенные изменения пламени, повторяющие ту картину, которая наблюдалась при понижении уровня жидкости в горелках.

Четвертая серия опытов проводилась с металлическими резервуарами. Сечение одного резервуара было квадратным (25×25 см). Второй резервуар был цилиндрическим с диаметром 130 см.

В квадратном резервуаре параллельно поверхности жидкости располагались трубки с внешним диаметром 6 мм. Расстояние между трубками составляло 3 мм. Расстояние от трубок до поверхности жидкости было равно 2 мм. По трубкам пропускалась вода. Расход воды изменялся от опыта к опыту.

Резервуар снаружи был покрыт асбестом, а его края изолированы от пламени специальными щитками. Во время каждого опыта уровень жидкости в резервуаре поддерживался неизмен-

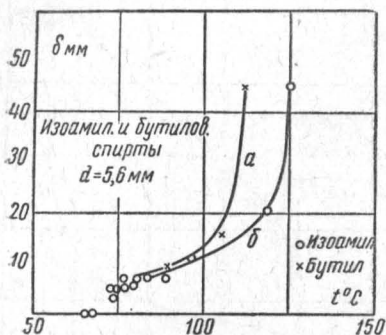


Рис. 8. Зависимость высоты пламени при горении изоамилового и бутилового спиртов от температуры на поверхности жидкости.

ным и измерялась температура входящей и выходящей воды. Опыты проводились с керосином. Результаты опытов приведены на рис. 9. Здесь по оси абсцисс отложена температура на поверхности горящей жидкости, а по оси ординат скорость сгорания жидкости, количество тепла  $q_{ж}$ , необходимое для испарения соответствующего объема жидкости, количество тепла  $q_n$ , которое отбиралось водой, протекающей по трубкам, и количество тепла  $Q_n$ , полученное жидкостью от пламени в единицу времени.

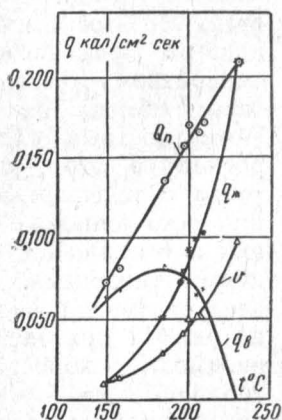


Рис. 9. Зависимость скорости сгорания, тепла испарения, тепла, уносимого водой, тепла, поступающего от пламени, от температуры на поверхности керосина.

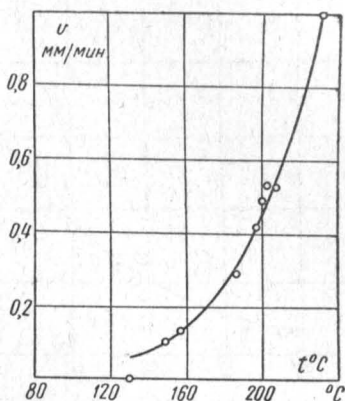


Рис. 10. Зависимость скорости сгорания керосина от температуры на поверхности жидкости.

Оказалось, что в данном случае зависимость  $v(t)$  достаточно хорошо описывается соотношением (2). Это видно из рис. 10, на котором сплошная линия проведена в соответствии с этим уравнением при значении  $W = 11\,800$  (теплота испарения керосина равна  $10\,800$ ).

Понижение температуры в резервуаре с диаметром 130 см достигалось путем перемешивания керосина с воздухом, поступающим в горючее через насадок в центре дна резервуара. Регулируя подачу воздуха, можно было изменять нужным образом температуру на поверхности жидкости. Следует заметить, что в данном случае температура в разных точках поверхности была различной. Эта разница достигала десятка градусов. С течением времени температура в каждой точке повышалась. За время опыта это повышение составляло  $20\text{--}30^{\circ}$ . Таким образом, в этих экспериментах можно было установить зависимость между скоростью сгорания и некоторой средней температурой (средней по площади и по времени). Результаты опытов, во время которых использовался цилиндрический резервуар, приведены на рис. 11.

Обращаясь к рис. 10 и 11, нельзя не обратить внимание на то, что пламя в первом и втором резервуарах гасло при температурах, сильно отличающихся друг от друга (на  $70^\circ$ ). Соответственно сильно отличались и скорости выгорания керосина при одной и той же температуре. Эту разницу можно объяснить следующим образом. В цилиндрическом резервуаре жидкость перемешивалась и на поверхность все время выносилось топливо начального состава, богатое легко кипящими фракциями. В квадратном резервуаре такого обмена не было. Поверхностный слой керосина в этом случае терял с течением времени легко кипящие фракции и обогащался фракциями тяжелыми. Далее следует иметь в виду, что на рис. 11 приведена зависимость скорости выгорания керосина от средней температуры. Так как скорость быстро растет с повышением температуры на поверхности

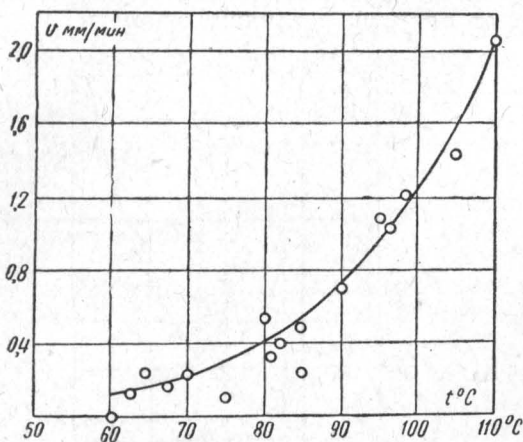


Рис. 11. Зависимость скорости от средней температуры на поверхности при перемешивании керосина.

сти жидкости, то величина  $v$ , отвечающая той или иной средней температуре, будет завышена.

Так как скорость сгорания жидкости в резервуарах подчиняется соотношению (2), где величина  $W$  близка к молярной теплоте испарения, скорость  $v$  пропорциональна упругости пара поверхности горящей жидкости. Это дает основание считать, что скорость сгорания жидкости в изученном температурном интервале определяется скоростью диффузии пара через пограничный слой. Толщина этого пограничного слоя, как показывают ориентировочные подсчеты, порядка 2 см.

### Выводы

Проведенными опытами установлено, что скорость сгорания жидкости в резервуарах существенно зависит от температуры жидкости на поверхности.

При понижении температуры скорость сгорания резко уменьшается. Вблизи температуры затухания данного вида топлива скорость сгорания и температура жидкости связаны экспоненциальным законом.

Установленная закономерность указывает на целесообразность охлаждения жидкости во время тушения пожара с целью снижения интенсивности горения.

Охлаждение жидкости будет особенно эффективным в комбинированных методах тушения, как, например, тушение распыленной водой и пеной.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. Изд. АН СССР, 1961.
  2. Блинов В. И. О скорости горения бинарных смесей жидкостей. Труды ЛИАП. Вып. 7, 1954.
  3. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1947.
-

*Канд. техн. наук А. Н. БАРАТОВ,  
инженер В. М. КУЧЕР*

## **ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ ВЗРЫВАЕМОСТИ ПАРО-ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ**

В связи с бурным развитием химической промышленности внедряются в производство различные новые вещества, многие из которых являются горючими и взрывоопасными. Одним из важнейших показателей, характеризующих взрывоопасность горючих газов и жидкостей, являются концентрационные пределы взрываемости. Под ними подразумеваются предельные концентрации горючих паров и газов в воздухе, вне которых при постороннем поджигании взрыв не распространяется.

В то время как для определения некоторых характеристик (например, температуры вспышки) имеются стандартные приборы, метод определения пределов взрываемости у нас не стандартизирован. Поэтому из-за использования различных методов определения концентрационных пределов взрываемости (применение металлических сосудов различной формы и размеров, стеклянных пипеток и т. п.), приводимые в литературе сведения по пределам взрываемости для одних и тех же веществ значительно отличаются.

В связи с этим возникла необходимость разработать прибор, позволяющий получить достаточно точные данные о пределах взрываемости.

Принятый нами метод определения концентрационных пределов взрываемости горючих газов и паров в воздухе основывался на работах Коварда и Джонса [1].

Для определения пределов взрыва паро-газовоздушных смесей был разработан прибор, изображенный на рис. 1.

Этот прибор представляет собой цилиндрический сосуд с внутренним диаметром 60 мм и высотой 1,5 м, выполненный из молибденового стекла. Сосуд снабжен кранами А и Б, через которые производится откачивание системы и дозировка горючей смеси. В нижней части в сосуд на шлифах введены электроды, с помощью которых производится поджигание горючей смеси искровым разрядом от индуктора ИВ-100. К верхней части сосуда с помощью спирали присоединяется на шлифах ртутный манометр. Нижний конец сосуда соединен с всасывающим шту-



цером вентилятора. Корпус вентилятора и крыльчатка выполнены из нержавеющей стали. Двигатель вентилятора помещен в герметичный кожух. Перемешивание заготовленной смеси осуществляется путем циркуляции через реакционный сосуд, венти-

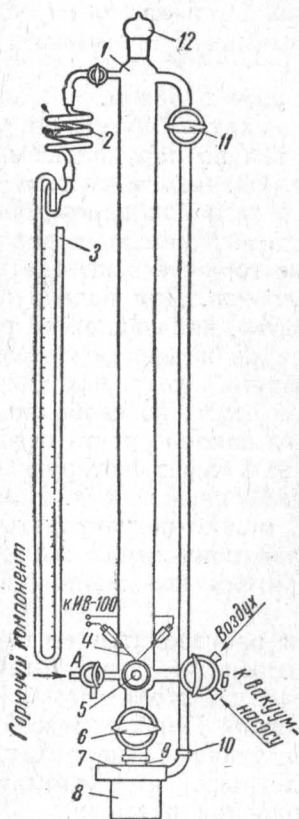


Рис. 1. Схема установки:  
1 — реакционный сосуд; 2 — соединительная спираль; 3 — ртутный манометр; 4 — электроды; 5 и 12 — прищипованные пробки; 6 и 11 — стеклянные краны; 7 — вентилятор; 8 — двигатель; 9 и 10 — штуцеры вентилятора.

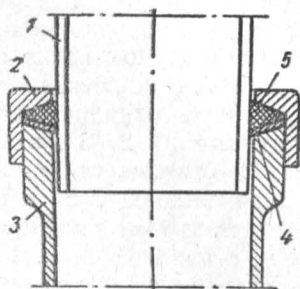


Рис. 2. Способ соединения стеклянного штуцера с металлическим:

1 — штуцер стеклянный; 2 — гайка; 3 — штуцер металлический; 4 — прокладка из фторопласта толщиной около 0,5 мм; 5 — прокладка резиновая.

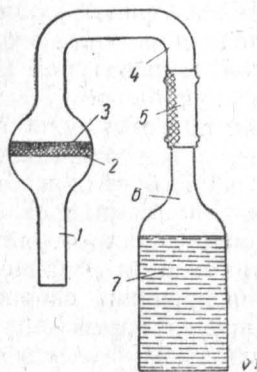


Рис. 3. Дозатор паров жидкостей:

1 и 4 — штуцеры фильтра; 2 — пористая пластинка; 3 — ртуть; 5 — вакуумная резиновая трубка; 6 — испаритель; 7 — испытываемая жидкость.

лятор и боковую трубку. Перемешивание газовой смеси является непременным условием для получения надежных результатов, так как вследствие большой высоты реакционного сосуда и различий в плотности исследуемых веществ приготовленная смесь на различной высоте неоднородна по составу. Таким образом обеспечивается приготовление однородной смеси в течение 30 сек. Способ соединения стеклянных трубок со штуцерами вентилятора иллю-



стрируется рис. 2. Это соединение обеспечивает надежную герметичность и позволяет, в случае необходимости, быстро отсоединять реакционный сосуд от вентилятора. Краны предназначены для отключения вентилятора от реакционного сосуда перед поджиганием смеси. Через штуцеры с пришлифованными пробками производится отсасывание продуктов реакции и промывка системы чистым воздухом после опыта.

Определение осуществляется следующим образом.

Вся система откачивается с помощью вакуум-насоса до остаточного давления 2—3 мм рт. ст., а затем по парциальным давлениям заготавливается горючая смесь. Сначала в систему подается вычисленное количество горючего газа или паров горючей жидкости, после чего подается воздух до выравнивания давления в системе с атмосферным. Газообразные горючие вещества подаются в систему непосредственно из баллонов. Для подачи паров горючих жидкостей применяется устройство, показанное на рис. 3, из которого видно, что прохождению паров жидкости из испарителя к штуцеру препятствует слой ртути, покрывающий пористую пластинку; фильтр задерживает ртуть, но свободно пропускает пары и воздух. Поэтому при его наклоне ртуть освобождает поверхность фильтрующей пластинки, через которую пары жидкости проходят к штуцеру и в реакционный сосуд. Изменяя угол наклона фильтрующей пластинки, можно регулировать скорость подачи паров в систему. В случае применения жидкостей с высокой температурой кипения испаритель помещается в нагревательную баню.

После приготовления горючей смеси производится ее перемешивание, затем открывается нижнее отверстие, перекрываются краны, и смесь поджигается. Наблюдение за характером распространения пламени производится визуально. Прибор может быть также оборудован соответствующими датчиками (например, фотоэлектрическими с записью на осциллографе) для автоматического фиксирования скорости распространения пламени.

За предел взрываемости принимается та наименьшая (нижний), или та наибольшая (верхний) концентрация горючего вещества в смеси, при которой еще происходит распространение пламени по всей высоте реакционного сосуда.

В таблице приводятся результаты определения на описанном приборе концентрационных пределов взрываемости ряда горючих веществ, в сравнении с литературными данными [1 и 2], подтверждающие надежность принятой нами методики.

Указанный прибор сравнительно не сложен и может быть использован не только для определения пределов взрываемости, но и для изучения влияния различных веществ на горение и взрывы газовых смесей.

Наименование веществ	Темпера- тура кипе- ния в °С	$d_4^{20}$ в г/см <sup>3</sup>	$n_D^{20}$	Пределы взрываемости в % горю- чего от объема смеси			
				эксперимен- тальные		литературные	
				нижний	верх- ний	нижний	верхний
Водород . . . . .				4,0	74,2	4,0 (1) 4,1 (2)	74,2 (1,2)
Пентан . . . . .	28—36*	0,6212	1,3575	1,45	7,85	1,5 (1) 1,35 (2)	7,8 (1), 8 (2)
Гексан . . . . .	68,7	0,6603	1,3750	1,17	7,20	1,20 (1) 1,1 (2)	7,5 (1), 6,9 (2)
Бензол . . . . .	80,1	0,8791	1,5017	1,45	7,12	1,40 (1) 1,4 (2)	7,1 (1) 9,5 (2)
Окись этилена .	12,5	—	1,3596 (7°)	3,0	81,0	3,0 (1,2) 1,9 (1)	80, (1,2)
Этиловый эфир .	34,5	0,7135	1,3539	1,9	48,0	1,6 (2)	48 (1,2)

\* В продукте найдено: нормального пентана—52,9%; изопентана—40,6%

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Coward H., Jones W. Bull. Bureau of Mines, № 503, 1952.
2. Справочник химика. Госхимиздат, Т. 3, М. 1952, 38—41.



*Канд. техн. наук А. Н. БАРАТОВ,  
инж. В. М. КУЧЕР, инж. А. Г. ПРИЩЕП*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТИ ВЗРЫВАЕМОСТИ СИСТЕМЫ ОКИСЬ ЭТИЛЕНА — БРОМИСТЫЙ МЕТИЛ — ВОЗДУХ**

В настоящее время для стерилизации предметов из синтетических материалов, применяемых в хирургии, используется окись этилена. Пары окиси этилена в смеси с воздухом взрывоопасны в широких пределах (от 3 до 80% по объему).

Взрывоопасность может быть снижена путем разбавления смеси инертными газами или флегматизацией, с помощью ингибирующих добавок. За рубежом для целей стерилизации используются смеси окиси этилена с углекислым газом в различных соотношениях. Наиболее широко применяется смесь, состоящая из 10% окиси этилена и 90% углекислоты, известная в ФРГ под торговым названием «Каротокс» (Carotox). Недостаток этой смеси заключается в низкой концентрации окиси этилена, что значительно ухудшает ее эффективность. Повышение концентрации за счет увеличения давления требует сложной и дорогостоящей аппаратуры. Известен еще ряд подобных составов (например, оксифум — 80% углекислоты и 20% окиси этилена, криоксид — 44,5% дифтордихлорметана, 44,5% фтортрихлорметана и 11% окиси этилена), которые либо не являются гарантированно взрывобезопасными (оксифум), либо обладают сравнительно невысокой эффективностью (криоксид).

С целью повышения споридности окиси этилена и сокращения экспозиции стерилизации было предложено добавлять к окиси этилена бромистый метил, который, в свою очередь, обладает споридными свойствами и, кроме того, является ингибитором горения.

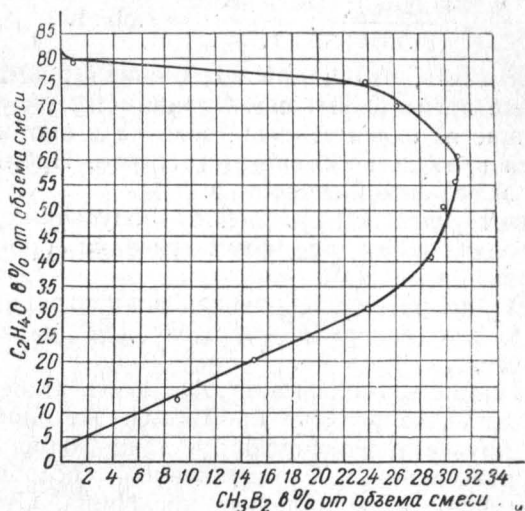
Так как в литературе отсутствуют какие-либо сведения по флегматизации бромистым метилом смеси паров окиси этилена с воздухом, нами были проведены исследования для определения взрывобезопасного соотношения этих компонентов и воздуха в газовой фазе.

Из существующих методов оценки воздействия флегматизаторов на область взрываемости различных горючих веществ наиболее надежные результаты получаются при изучении влияния их

на пределы взрываемости. Поэтому исследование области взрываемости системы окись этилена — бромистый метил — воздух производилось на установке, описанной в предыдущей статье.

Окись этилена и бромистый метил имели соответственно следующие характеристики:

Молекулярный вес . . . . .	44,05 и 94,95
Температура плавления . . . . .	—111,3 и —93,7°C
Температура кипения . . . . .	12,5 и 3,6°C
Удельный вес . . . . .	0,8824 и 1,732 кг/см <sup>3</sup>
Коэффициент рефракции . . . . .	1,3596



Кривая влияния бромистого метила на область взрываемости смеси окись этилена — воздух.

В результате проведенных исследований влияние бромистого метила на область взрываемости смесей окись этилена — воздух графически представлено на рисунке. По оси ординат этого графика отложено содержание паров окиси этилена, а по оси абсцисс — количество паров бромистого метила в процентах от объема смеси. Количество воздуха в любой точке системы равно разности между 100% и суммарным содержанием окиси этилена и бромистого метила. Область взрываемости ограничена кривой и осью ординат. Смеси, отвечающие составу, расположенному внутри этой области, при постороннем поджигании взрываются. Вне этой области взрыва не происходит. Полученные результаты показывают, что при концентрациях бромистого метила выше 31,2%, независимо от количества окиси этилена, испытывавшиеся смеси при постороннем поджигании не взрываются. Пересечение двух ветвей кривой (нижней и верхней) происходит в точке, характеризующейся тем, что для флегматизации тройной смеси, отвечающей этому составу, требуется наибольшее количество бро-

мистого метила. Эта точка называется «пиком» воспламенения. Из рисунка видно, что для исследуемой смеси эта точка соответствует 60% концентрации окиси этилена от объема смеси.

С некоторым запасом можно рекомендовать в качестве безопасного для практического использования объемное соотношение в паровой фазе между окисью этилена и бромистым метилом, равное  $60 : 40 = 1,5 : 1$ . Весовое соотношение между жидкими компонентами при этом должно составлять (исходя из значений молекулярных весов)  $44,05 \times 1,5 : 94,95 = 1 : 1,44$ . Объемное соотношение в жидкой фазе составит:

$$\frac{44,05 \times 1,5}{0,8824} : \frac{94,95}{1,732} = 1,36 : 1.$$

Следует отметить, что и при содержании бромистого метила несколько ниже предельной концентрации (см. рисунок) тройные смеси, состоящие из окиси этилена, воздуха и бромистого метила, не взрываются в полном смысле этого слова. Наблюдается лишь сгорание их с замедленной скоростью.

Представляет интерес сравнение полученных результатов с данными, полученными при флегматизации бромистым метилом других горючих веществ.

Так для гексана флегматизирующая концентрация бромметила составляет 5,8, для водорода — 13,5, а для окиси этилена — 31,2% по объему.

Анализ этих данных показывает, что окись этилена значительно труднее флегматизировать бромистым метилом, чем гексан (и, очевидно, другие углеводороды) и даже водород. По-видимому, это объясняется высокой реакционной способностью окиси этилена и наличием в ее молекуле кислорода. Отсюда следует, что при воздействии галоидированных углеводородов на пламя оказывает влияние вывод из зоны реакции кислорода в активной форме.

Специфика, наблюдаемая при флегматизации окиси этилена, представляет известный интерес и требует дальнейшего изучения с использованием различных по природе флегматизаторов.

---



## ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ЗДАНИЙ МАССОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Проблема безопасной эвакуации людей при пожаре из зданий массового назначения имеет важное значение. Однако пока еще нет оснований считать, что данная проблема надежно разрешена. Это прежде всего относится к нормированию — основе для решения практических задач по организации безопасной эвакуации.

При ознакомлении с действующими в настоящее время нормами по эвакуации людей из зданий массового назначения нельзя не обнаружить в них крупных недостатков, оказывающих отрицательное влияние на качество проектирования общественных зданий.

Важнейшими недостатками норм являются:

- а) разнотипность и несогласованность принципов, положенных в основу норм;
- б) техническое несовершенство и необоснованность некоторых содержащихся в них положений;
- в) отсутствие в нормах достаточных организующих и координирующих начал.

Рассмотрим эти недостатки на примерах.

Прежде всего о разнотипности приемов нормирования. Основной принцип норм — ограничение продолжительности эвакуации людей из здания допустимым пределом, учитывающим специфику местных условий. Данный принцип во «Временных нормах строительного проектирования театров» (§ 292) выражен определенными сроками эвакуации, тогда как в позднейших «Противопожарных нормах строительного проектирования» (Н 102—54) лишь указаны предельные удаления рабочих мест от выходов (§§ 26; 28; 29).

Этот пример не исчерпывает перечня разновидностей принципов нормирования, которыми изобилуют нормы по эвакуации. Важно отметить, что различие официально предписываемых способов решения одних и тех же вопросов приводит к неидентичным и несопоставимым результатам при решении практических задач, что создает много неудобств и вносит ненужную путаницу.



Примером технически несовершенных и малообоснованных нормативов может служить следующий.

«Временными нормами строительного проектирования театров» указывается, что в эвакуирующихся потоках люди располагаются правильными продольными рядами («в затылок» друг другу), хотя хорошо известно, что в действительности подобная структура потоков никогда не наблюдается. Наоборот, эвакуирующиеся потоки всегда беспорядочны.

Принятие этого исходного условия привело ко включению в состав норм другого столь же искусственного положения (§ 298), обязывающего устраивать эвакуационные пути и выходы шириной, кратной ширине человеческого тела (1,2; 1,8; 2,4 м). Промежуточные размеры выходов и проходов «Нормами» не допускаются. Между тем исследования показывают, что при прочих равных условиях пропускная способность выходов и путей изменяется пропорционально изменению их ширины и совершенно не зависит от условия, трактуемого § 298.

Следует отметить еще один крупный общий недостаток, заключающийся в том, что требования действующих норм по эвакуации затрагивают далеко не все виды общественных зданий и сооружений. Как это ни парадоксально, но существует множество общественных зданий, на которые не распространяются вообще никакие нормы по эвакуации. К их числу относятся, например, стадионы, спортивные залы, залы для собраний и концертов, музеи, выставки и многие другие. При проектировании эвакуационных путей для таких зданий, по необходимости, используются нормы, предназначенные для других типов общественных сооружений, не отражающих специфических особенностей проектируемых зданий. Таковы некоторые примеры недостатков норм эвакуации людей из зданий.

Отсюда вытекает необходимость их пересмотра, от успешного осуществления которого в большой степени будет зависеть качество проектирования общественных зданий.

Из сказанного не следует, однако, что действующие нормы от начала и до конца неправильны. Напротив, в них есть немало положений, ценность которых проверена многолетней практикой. Такие положения норм заслуживают бережного к себе отношения и им должно быть отведено надлежащее место в будущих нормах.

Еще совсем недавно, единственными источниками, из которых черпались материалы для противопожарных норм вообще и для эвакуационных в частности, были статистические данные о пожарах и личный практический опыт отдельных специалистов. Иногда в качестве источника привлекались зарубежные нормы. Влиянию именно таких, недостаточно полных и точных источников, мы обязаны существованием норм, характеризующихся столь многочисленными пробелами.

Во всех областях техники и производства считается само собой разумеющимся, что внедрению в производство нового механизма или технологии обязательно предшествует исследование,

результаты которого принимаются в качестве базы при проектировании нового механизма или технологического процесса.

По аналогии со сказанным, следует заключить, что путь к упорядочению норм по эвакуации также должен лежать через исследование, так как лишь обстоятельное и всестороннее изучение процессов эвакуации может, в соединении с накопленным практическим опытом, дать в наши руки прочную основу для усовершенствования норм. Такие исследования в значительной мере уже произведены в СССР в течение последних 10—15 лет. Сейчас в нашем распоряжении накопились богатые исследовательские материалы, широко раскрывающие закономерности процессов движения потоков людей. Таким образом, налицо все возможности и условия для пересмотра норм по эвакуации и приведения их в соответствие с объективными данными науки и требованиями современного проектирования.

Одновременная массовая эвакуация может быть двух видов: предусмотренная заранее и внезапная.

Заранее предусмотренную эвакуацию можно наблюдать, например, после окончания спектакля в театре, после завершения рабочего дня на фабрике и т. д. Обычно она протекает спокойно и более или менее планомерно, так как ее участники заблаговременно осведомлены как о самом факте предстоящей эвакуации, так и о времени ее начала, цели и маршруте движения. Это решающим образом предопределяет режим процесса и обеспечивает заданные сроки его завершения. Наблюдающиеся иногда случаи неожиданного нарушения движения эвакуирующихся (падение человека, встречный поток и т. п.) не дезорганизуют процесса в целом, ибо являются кратковременными и носят местный характер.

Иную картину может представлять одновременная массовая эвакуация, потребность в которой возникает внезапно, под влиянием экстренной необходимости. В этих условиях процесс эвакуации также может протекать относительно планомерно и закончиться в общем благополучно, особенно, если в интересах безопасности людей заблаговременно приняты надлежащие меры. Однако, по сравнению с нормальными условиями, вынужденный процесс отличается повышенной напряженностью, которая под влиянием самых разнообразных факторов может принимать очень острую форму и иногда, как показывает опыт, перерастать в панику.

Непосредственной причиной возникновения паники является ощущение страха перед некоторой опасностью, охватывающее одновременно, а иногда мгновенно, массу собравшихся людей и побуждающее их к инстинктивному удалению от источника опасности. При этом источник может быть действительным или мнимым, а расположение его очевидным или предполагаемым.

Основная опасность паники состоит в потере некоторой частью участвующих в эвакуации людей способности к хладнокровной оценке сложившейся обстановки и разумным действиям, что мо-

жет привести к дезорганизации процесса, таящей в себе опасность несчастных случаев.

Общей чертой аварийной эвакуации является повышенная против обычного напряженность, сопровождающаяся усилением темпа движения потоков людей к выходам. При этом как то, так и другое, изменяется от некоторого, присущего данной обстановке, максимума в наиболее опасной зоне, до нормального или близкого к нему состояния в конце процесса, вдали от места пожара, где опасности уже нет и ощущение страха исчезает.

Можно наметить следующие общие соображения по упорядочению норм:

1. Для ликвидации разнотипности и несогласованности между нормами по эвакуации целесообразно отказаться от их множественности и разработать единые нормы по эвакуации для всех зданий массового назначения, независимо от их характера и ведомственной принадлежности.

Преимущества единых норм очевидны и не нуждаются в специальных доказательствах. Что касается допустимости объединения, то она вытекает из того простого факта, что при всем многообразии типов и функциональных групп общественных зданий, они, с эвакуационной точки зрения, имеют очень много общего, вследствие чего эвакуация общественных зданий вполне поддается единому регламентированию.

Конечно, такие нормы должны обладать достаточной универсальностью, в смысле учета особенностей каждой группы зданий.

2. Объединенные нормы должны быть разработаны на базе современных данных науки, с учетом многолетнего практического опыта и требований современного проектирования. Необходимо отказаться от тех устарелых нормативов и приемов нормирования, которые неполно и, в ряде случаев, искаженно отражают процесс эвакуации.

3. Показателями, составляющими содержание норм, следует возможно точнее отразить истинный характер процесса эвакуации. В нормах должна быть зафиксирована отвечающая действительности взаимосвязь и взаимозависимость между параметрами, определяющими характер процесса. Только на такой основе возможно в ходе проектирования правильно представить себе и воспроизвести процесс эвакуации, а при необходимости, внести в него полезные коррективы и усовершенствования без опасения допустить ошибку.

4. Необходимо, чтобы нормы давали возможность решать практические задачи по эвакуации современными инженерными методами, преимущества которых общеизвестны, но в то же время они должны быть доступны также широкому кругу работников-практиков, призванных организовывать эвакуационную обеспеченность на местах.

Ниже излагаются предложения по нормированию основных параметров эвакуационного процесса и их обоснование. Эти предложения базируются прежде всего на отечественных исследова-

тельских данных. Кроме того, в них учтен накопленный в этой области опыт и требования, предъявляемые к современным проектам.

Положения действующих норм, по которым не возникает принципиальных замечаний, в настоящей статье не затрагиваются.

**Продолжительность эвакуации.** Из всех до сих пор известных способов оценки степени обеспеченности общественных зданий в эвакуационном отношении наиболее объективным и в то же время всеобъемлющим является метод сопоставления фактической (расчетной) продолжительности эвакуации с допускаемой для данных условий. По этому методу здание считается подготовленным в эвакуационном отношении в том случае, если фактическая продолжительность его эвакуации меньше или равна допускаемой. Всякие иные способы из числа известных, внешне иногда более простые и потому кажущиеся привлекательными, не дают столь же полного представления о степени соответствия здания условиям безопасной эвакуации.

Критерий продолжительности эвакуации впервые был предложен в 1937 г. проф. С. В. Беляевым и вошел в качестве важной составной части в «Нормы проектирования театров». Последующий период подтвердил жизнеспособность и полезность этого предложения.

По своему внутреннему содержанию параметр Беляева является собирательным. Он объединяет в себе и учитывает все элементы и особенности процесса эвакуации в данных условиях. С его помощью не только стала доступной общая оценка фактической подготовленности здания в эвакуационном отношении, но и заблаговременное назначение уровня эвакуационной обеспеченности, которому здание должно удовлетворять. В этом отношении никакой другой способ не в состоянии выдержать сравнения с параметром Беляева.

Связь между фактической (расчетной) и допускаемой продолжительностью эвакуации математически выражается следующим образом:

$$\tau \leq \tau_0, \quad (1)$$

где  $\tau$  — фактическая (расчетная) продолжительность эвакуации;  $\tau_0$  — предельно допускаемая для данных условий продолжительность эвакуации.

Отношение допускаемой продолжительности эвакуации к фактической (расчетной) дает коэффициент  $k$ , равный

$$k = \frac{\tau_0}{\tau} \quad (2)$$

и выражающий собой запас эвакуационных возможностей у данного здания.

Продолжительность эвакуации здания  $\tau$  включает в себя продолжительность движения  $t_i$  в отдельных помещениях и элемен-



тах пути. Срок протекания процесса в каждом из них является функцией нескольких переменных, а именно:

$$t_i = f(N; D; V; \delta; l; Q) \text{ мин.}, \quad (3)$$

где  $N$  — количество эвакуирующихся людей;

$D$  — плотность потока;

$V$  — скорость движения;

$\delta$  — ширина участка пути;

$l$  — его длина;

$Q$  — пропускная способность.

В единых нормах по эвакуации параметру Беляева должно быть отведено подобающее место в форме указания конкретных пропускаемых сроков эвакуации, учитывающих условия, которыми отличаются друг от друга группы общественных зданий и отдельные типы сооружений, а иногда и их внутренние помещения. Такие данные имеются пока только для театров, и то лишь, как первое приближение.

С принятием критерия Беляева отпадает необходимость включения в нормы многочисленных косвенных нормативов, не говоря уже о том, что это откроет перед архитекторами более широкие творческие возможности.

Вопрос о нормировании допускаемой продолжительности эвакуации очень ответственный и не может решаться на основании только интуиции и личного опыта. Путь к правильному определению оптимальных сроков эвакуации лежит через исследование, в ходе которого должны быть выяснены все те факторы, от которых может зависеть величина допускаемой продолжительности эвакуации и доля участия каждого из факторов. К числу последних относятся: вероятность возникновения пожара, ожидаемая интенсивность его развития, степень огнестойкости здания, этажность, массовость процесса эвакуации, контингент участвующих в эвакуации, психический фактор, важность и уникальность здания.

Величины допускаемой продолжительности эвакуации могут быть представлены в нормах в виде таблицы, в которой для каждого типа общественного здания и каждого возможного его варианта указываются конкретные предельные сроки эвакуации.

Составление такой таблицы представляет нелегкую, но необходимую исследовательскую задачу. Таблица должна быть основана на вполне надежных данных: таковыми являются, в частности, статистические материалы, накопленные УПО и ОПО в процессе многолетней профилактической и оперативной работы.

**Плотность потока.** Из материалов исследований известно, что плотность потока оказывает исключительно большое влияние на ход процесса эвакуации. И скорость движения и пропускная способность участков пути, являющиеся важными элементами процесса, сильно изменяются по мере изменения плотности потока эвакуирующихся людей. Поэтому, от точности и правильности учета

плотности в сильной степени зависят режим движения потоков и сроки завершения эвакуации.

Выражение плотности линейными единицами в предположении, что люди двигаются продольными рядами (элементарными потоками), как это принято «Временными нормами строительного проектирования театров» (1943 г.), представляется нецелесообразным ни в смысле упрощения схемы процесса, ни, главным образом, в отношении его соответствия действительным условиям. Логичнее и не менее просто плотность потока  $D$  выразить числом человек, приходящихся на единицу площади пола, например, на  $1 \text{ м}^2$ , т. е.

$$D = \frac{N}{\delta l} \text{ чел/м}^2 \quad (5)$$

или обратной величиной

$$\frac{1}{D} = \frac{\delta l}{N} \text{ м}^2/\text{чел}, \quad (6)$$

где  $N$  — общее число людей, находящихся на данном участке пути;

и  $l$  — ширина и длина этого участка.

Плотность может быть также выражена отношением суммы площадей горизонтальных проекций людей, находящихся на данном участке пути, к площади пола этого участка:

$$D = \frac{\Sigma f}{\delta l} \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (7)$$

где  $f$  — площадь горизонтальной проекции одного человека.

Последний способ выражения плотности потока менее нагляден, но иногда может оказаться удобным тем, что учитывает различия в размерах людей разного возраста и различно одетых.

Проведенными замерами установлено, что средние площади (в  $\text{м}^2$ ) горизонтальных проекций людей следующие:

	В зимней одежде	В летней одежде
Взрослый	0,126	0,095
Подросток	0,091	0,067

Плотность потока может изменяться в широких пределах: от величин, близких к нулю, до максимума, составляющего физический предел плотности. Последний равен для взрослых людей в зимней одежде:

$$7,3 \text{ чел/м}^2 \text{ или } 0,137 \text{ м}^2/\text{чел} \text{ или } 0,92 \text{ м}^2/\text{м}^2. \quad (8)$$

Успешное завершение вынужденной эвакуации, особенно, если она осуществляется под влиянием реальной опасности, во многом



зависит от напряженности процесса. Чем напряженность больше, тем вероятнее неожиданные задержки движения и несчастные случаи. Напряженность же, в свою очередь, в большой мере зависит от степени уплотненности потока. Наибольшей остроты процесс достигает обычно на участках, где плотность потока составляет физический предел или близка к нему. Таким образом, при аварийной эвакуации область высоких плотностей является всегда носителем опасности несчастий с людьми.

По этой причине представляется желательным, чтобы в нормах имелось специальное указание, воспреещающее иметь в общественных зданиях эвакуационные пути, в которых могут образовываться высокие плотности. Это особенно необходимо в районе, близком к вероятному очагу аварии или пожара, где, кроме прочих отрицательных факторов, на передний план может выступить еще один сильный и опасный фактор — психический.

Целесообразность такой меры подтверждается, кроме того, и технико-экономическими причинами. Как будет видно из последующего, область высоких плотностей характеризуется наименьшими значениями скорости движения и резким падением пропускной способности пути.

**Скорость движения потоков людей** оказывает огромное влияние на процесс эвакуации и на такие важные его показатели, как срок завершения процесса и режим его протекания. Данный параметр был впервые использован в 1943 г. в театральных нормах. С этого времени он стал официально признанной и неотъемлемой частью всех расчетов эвакуационных путей для вновь проектируемых театров.

Однако расчетная скорость, принятая нормами 1943 г. в виде постоянной величины для всех условий и режимов процесса, не отвечает действительным условиям и, вследствие этого, вносит в проекты ошибки.

Последующие, весьма обширные исследования ЦНИИПО и других организаций исчерпывающим образом подтвердили это и, вместе с тем, дали возможность выяснить закономерности, которым параметр скорости подчиняется. Исследования позволили более точно сформулировать взаимозависимость между скоростью движения потока и факторами, влияющими на нее.

Установлено, что величина скорости эвакуационного движения практически совершенно не зависит от назначения общественно-го здания, что сильно упрощает задачу нормирования, и, вместе с тем, стимулирует объединение многочисленных видов общественных зданий в составе единых норм.

Исследования показали, что при прочих равных условиях скорость горизонтального движения потоков значительно отличается от скоростей движения вниз и вверх по лестнице.

Но еще большее влияние на скорость оказывает плотность потока. Чем она выше, тем меньше скорость, и наоборот, причем связь между скоростью и плотностью не линейная. На рис. 1 представлены усредненные значения скоростей движения по горизон-

тали и лестнице для всего диапазона плотностей, полученные на основании большого числа наблюдений.

Но кривые на рис. 1 отражают скорости эвакуационного движения в спокойных (не аварийных) условиях и притом лишь средние их значения. Поэтому может возникнуть естественный вопрос о допустимости использования их для расчета аварийной эвакуации, поскольку последняя по своему характеру отличается от спокойной. Этот важный вопрос заслуживает более подробного рассмотрения.

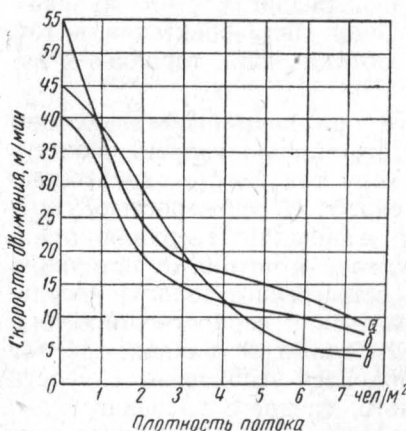


Рис. 1. График зависимости скорости движения потока от его плотности:  
а — скорость движения потока по горизонтальному пути; б — скорость движения потока по лестнице вверх; в — скорость движения потока по лестнице вниз.

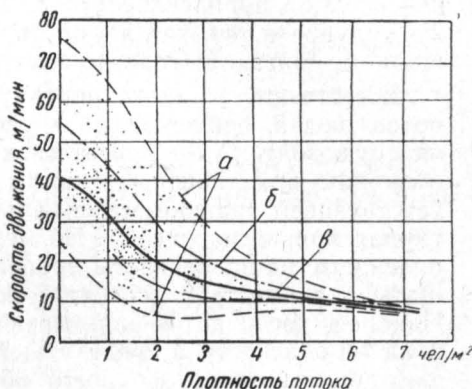


Рис. 2. График замеров скоростей движения вверх по лестнице:  
а — максимальные колебания; б — средне-взвешенные отклонения от средней скорости; в — средняя скорость.

Вначале заметим, что физическая сущность процесса движения не меняется от изменения причины, вызывающей его. В аварийных условиях может изменяться лишь психическое содержание процесса, характеризующееся повышением напряженности и стремлением людей скорее покинуть опасную зону, вследствие чего усиливается темп протекания процесса.

Исследования показывают, что скорость потока людей, даже при одной и той же плотности, не является постоянной, а, наоборот, может под влиянием самых различных причин колебаться, причем для каждой данной плотности потока наибольшая амплитуда колебаний вполне определенная. Она возрастает с уменьшением плотности потока и затухает по мере ее роста. При физическом пределе плотности амплитуда колебаний скорости близка к нулю. Данная закономерность четко вырисовывается, если результаты наблюдений эвакуационного движения нанести на координатную сетку (рис. 2). Сплошной линией показано среднее значение скорости, построенное по экспериментальным точкам, пунк-

тирными огибающими линиями — границы максимальных колебаний этой скорости, а линиями «точка-тире» — границы средневзвешенных отклонений от средней скорости.

Причина колебаний скорости потока заключается в наличии у каждого эвакуирующегося человека некоторой индивидуальной свободы движения. Последняя тем ограниченнее, чем больше плотность потока и наоборот. В пределах данного диапазона колебаний скорости люди в потоке вольны, по своему усмотрению, изменять ее, если это соответствует желанию всех или большинства эвакуирующихся. В действительности так и бывает. Например, в театре во время антракта люди передвигаются по кулуару не спеша, в порядке прогулки, а по окончании спектакля в том же кулуаре и при той же плотности потока люди, торопясь к вешалкам, двигаются гораздо быстрее.

Естественно ожидать поэтому, что при аварийной эвакуации поток людей, единодушный в своем стремлении скорее покинуть опасную зону, будет двигаться к выходу так быстро, как только возможно при данной плотности потока, т. е. со скоростью, соответствующей границе максимальных колебаний (верхняя пунктирная кривая на рис. 2). По мере удаления потока от источника опасности напряженность процесса естественно должна уменьшаться, а вместе с ней будет понижаться и скорость движения. Наконец, когда поток эвакуирующихся достигнет района, где нет никакой опасности и среди людей воцарится успокоение, скорость движения снизится до своего обычного, среднего значения.

С учетом именно этих особенностей вынужденной эвакуации и должны быть подобраны нормативные показатели скоростей для расчета аварийной эвакуации.

Разумеется, что для спокойной эвакуации, наблюдающейся в общественных зданиях каждодневно, «аварийные нормы» не подходят. Очевидно, что для этого должны существовать другие показатели, отвечающие спокойным условиям движения.

Таким образом, чтобы получить полное представление о степени подготовленности здания в эвакуационном отношении, необходимо произвести два расчета: один для случая спокойной эвакуации и второй для случая аварийной. Выбранный в итоге расчетов эвакуационный путь по ширине, направлению и другим параметрам должен удовлетворять требованиям обоих видов эвакуации. В этом универсальном решении и должно заключаться искусство архитектора, проектирующего общественное здание.

Итак, исследовательские данные, собранные в обычных условиях, можно использовать для расчета любого вида эвакуации. Основываясь на этих данных и сказанном выше, можно для условий спокойной эвакуации рекомендовать в качестве нормативов средние показатели скоростей, выраженные кривыми на рис. 1.

Те же показатели в цифрах помещены в нижнем отделе табл. 1.

Что касается аварийной эвакуации, то для ее расчета представляется возможным предложить ступенчатую шкалу показа-

телей скорости, которая одновременно отражала бы влияние и плотности потока и степени напряженности процесса.

Таблица I

Скорость движения потоков в м/мин

Режим движения	Характер пути	Плотность эвакуирующегося потока в чел./м <sup>2</sup>							
		1	2	3	4	5	6	7	7,3
Максимально-быстрое (I зона)	По горизонтальному пути . . . . .	95	54	36,5	27,5	22	17	12	10
	Вниз по лестнице . . . . .	71	47	31,5	21,5	14	9	6	5,5
	Вверх по лестнице . . . . .	64,7	44	28,6	20	15	11,5	8,5	7,9
Ускоренное (II зона)	По горизонтальному пути . . . . .	56,3	32,7	23	19,2	17,3	14,5	11	9,5
	Вниз по лестнице . . . . .	46	34	24	16,2	10,5	7	5	4,5
	Вверх по лестнице . . . . .	44	29	19,5	14,5	12,5	10,5	8,5	7,8
Спокойное (III зона)	По горизонтальному пути . . . . .	37,6	24,4	19,7	17	14,6	12,2	9,1	8
	Вниз по лестнице . . . . .	39	29,1	29	12,8	8,5	5,7	4,3	4
	Вверх по лестнице . . . . .	32	19,7	14,5	12,4	11,2	10	8,5	7,9

Идея ступенчатой шкалы показателей заключается в следующем. Общественное здание условно разбивается на три зоны. Первая зона включает в себя район, в котором располагается наиболее вероятный очаг аварии или пожара, а также прилегающая к нему непосредственно угрожаемая территория. Во вторую зону включается район здания, где непосредственной угрозы эвакуирующимся со стороны очага аварии ожидать нет оснований, но некоторые ее признаки возможны (например, слабое ощущение присутствия дыма, отдаленный шум и т. д.). В третью зону входит вся остальная часть здания, где нет и не может быть в период эвакуации не только никакой опасности для эвакуирующихся, но и никаких признаков аварии вообще.

В пределах первой зоны, где следует ожидать бурного протекания процесса эвакуации, расчетными должны быть максимально возможные скорости, выраженные верхней границей их колебания. Во второй зоне, где острота положения существенно меньше, но не вошла еще в спокойную норму, можно ориентироваться на промежуточную кривую, являющуюся средневзвешенной между средней и максимальной. В третьей зоне, где напряженность процесса снизилась или почти снизилась до спокойной нормы, остаются в силе кривые, выражающие спокойное движение. Такова схема расчета.

Размеры зон и расположение их границ в каждом отдельном случае определяются с учетом местных условий. В некоторых

случаях могут оказаться только две зоны и даже всего лишь одна (например, для летнего кинотеатра без фойе и кулуаров).

В табл. 1 даны величины скоростей движения для каждой зоны на горизонтальных и наклонных путях в функции от плотности потока.

Время, потребное для преодоления эвакуирующимся лицом данного участка пути, равно:

$$t = \frac{l}{v} \text{ мин.}, \quad (9)$$

где  $l$  — длина участка пути в м;

$v$  — скорость движения, выбираемая с учетом плотности потока, характера пути и зоны, в которой участок пути находится в м/мин.

**Удельная пропускная способность.** На основании большого числа наблюдений установлено, что минутная пропускная способность элемента эвакуационного пути прямо пропорциональна плотности потока, скорости его движения при этой плотности и ширине элемента пути, т. е.

$$Q = DV\delta \text{ чел/мин}, \quad (10)$$

где  $Q$  — абсолютная пропускная способность;

$D$  — плотность потока;

$v$  — скорость движения;

$\delta$  — ширина пути.

Таким образом, пропускная способность пути является величиной переменной, зависящей от скорости, плотности потока и ширины пути.

Выражение (10) справедливо в том случае, если на протяжении рассматриваемого элемента пути нет резко сужающихся участков типа дверного проема. В месте, где путь резко сужается, пропускная способность подчиняется уравнению:

$$Q_\delta = \alpha DV\delta \text{ чел/мин}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  — безразмерный коэффициент, величина которого также зависит от плотности потока (табл. 2).

Таблица 2

Плотность потока в чел/м <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	7,3
$\alpha$	1,24	1,23	1,2	1,16	1,15	1,16	1,26	1,32

Этот коэффициент выведен, как и другие показатели движения, из экспериментальных данных.

При решении практических задач имеет важное значение понятие «удельная пропускная способность», выражающая собой пропускную способность единицы ширины (1 м) данного участка



пути в единицу времени (в 1 мин.). Удельная пропускная способность  $q$  равна

$$q = DV \text{ чел/м} \cdot \text{мин}, \quad (12)$$

а для проемов

$$q_d = \alpha DV \text{ чел/м} \cdot \text{мин}. \quad (13)$$

Существенно важно отметить, что, по мере роста плотности потока, удельная пропускная способность также увеличивается от 0 до некоторого максимума, после которого она идет на снижение. Для большинства случаев максимальному значению  $q_{\max}$  соответствует область плотностей от 5,5 до 6,5 чел/м<sup>2</sup>. По этой причине плотности, превышающие указанные значения, экономически менее выгодны, не говоря уже о том, что область плотностей от 6,0 до 7,3 чел/м<sup>2</sup> является и опасной в смысле возможности образования «пробки».

**Перегрузка эвакуационного пути** и, как следствие этого,—задержка движения вплоть до полной закупорки,—явление совершенно недопустимое в условиях эвакуации вообще и аварийной в особенности.

Основа для предупреждения таких явлений должна закладываться уже в процессе проектирования здания посредством соответствующей координации ширины пути и числа эвакуирующихся по нему в единицу времени людей.

Профессор В. М. Предтеченский сформулировал условие, при соблюдении которого можно избежать перегрузок пути:

$$q_1 \delta_1 = q_2 \delta_2, \quad (14)$$

где  $q_1$  и  $\delta_1$  — удельная пропускная способность и ширина предшествующего участка пути;

$q_2$  и  $\delta_2$  — удельная пропускная способность и ширина последующего по ходу движения потока участка пути.

Хотя выражение (14) справедливо только для интервала величин удельной пропускной способности от  $q = 0$  до  $q_{\max}$ , тем не менее ее целесообразно включить в нормы в качестве практического указания по предупреждению перегрузок эвакуационных путей.

**Ширину путей** внутри здания, рассчитанных на массовое движение людей при вынужденной эвакуации, безусловно целесообразно ограничивать минимальным и, в некоторых случаях, максимальным пределами. Необходимость этого вызывается, с одной стороны, опасностью закупорки слишком узких путей, а с другой — стремлением к дроблению чрезмерно мощных потоков на более мелкие в целях уменьшения массовости движения и понижения тем самым напряженности процесса, что особенно важно, когда последний угрожает перерасти в панику.

Действующие «Нормы проектирования театров» определяют в качестве минимальной ширины 1,2 м и максимальной 2,4 м. Эти пределы в общем правильны. Однако следует подчеркнуть, что нижний предел (1,2 м) должен быть распространен на эвакуаци-

онные пути всех без исключения типов общественных зданий, а не только некоторых из них, как это предусматривают нормы. Что касается верхнего предела ширины, то его целесообразно назначить в качестве обязательного только для тех участков эвакуационных путей, где формируются потоки людей. На последующих по ходу движения участках, если в данный поток не вливаются новые контингенты, нет никакой необходимости вносить подобное ограничение, так как всякое последующее уширение пути, вызывающее уменьшение удельной пропускной способности (см. формулу 14), лишь улучшает положение.

В целях борьбы с задымлением путей эвакуации во время пожара в нормах полезно иметь специальные указания. В качестве последних могут быть следующие:

а) устройство на путях эвакуации сплошных дымонепроницаемых диафрагм, способных преградить проникание дыма к путям эвакуации и не дать ему распространиться в пределах последних;

б) при устройстве в названных диафрагмах проемов для пропуска эвакуирующихся потоков эти проемы подлежат оборудованию плотными самозакрывающимися дверными полотнами. Высота дверных проемов на путях эвакуации не должна быть более 2 м, имея в виду, что плотные массы дыма сосредоточиваются вверху;

в) в помещениях, где вероятность пожара и ожидаемая интенсивность его развития высокие при наличии в непосредственной близости к ним значительного числа людей, подлежащих эвакуации, целесообразно, по примеру театров, устройство специальных, быстро открывающихся дымовых люков, способных создать тягу воздуха, а вместе с ним и движение дыма, в сторону, противоположную местонахождению эвакуируемых людей;

г) устройство в наиболее ответственных, замкнутых участках эвакуационных путей вентиляционных установок для создания в нужный момент искусственного подпора воздуха, величина которого исключала бы возможность проникания дыма из смежного задымленного помещения в данный участок эвакуационного пути;

д) оборудование эвакуационных путей естественными вытяжными устройствами для удаления дыма.

Наши соображения о нормировании касаются важной и далеко еще не решенной проблемы. Поэтому обстоятельное ее обсуждение представляется весьма желательным.

*Канд. техн. наук В. А. ПЧЕЛИНЦЕВ,  
канд. техн. наук В. С. ФЕДОРЕНКО*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРОВ ПОДВАЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Количество пожаров, возникающих в подвальных помещениях жилых и общественных зданий крупных городов, составляет 5—6% от общего числа пожаров. Они, как правило, не причиняют существенного материального ущерба, так как в подвалах в большинстве случаев сгорают дрова, старая мебель и другие малоценные предметы.

Однако тушение подобных пожаров связано со значительными трудностями, из-за задымленности подвальных помещений, а в ряде случаев лестничных клеток зданий. При тушении примерно 75% подвальных пожаров требуется участие газодымозащитной службы. Большое количество перегородок в подвалах, используемых для устройства хозяйственных сараев, создает дополнительные трудности в обнаружении очага горения. В тех случаях, когда подвал сообщается с лестничной клеткой, возникает также необходимость первоочередного проведения работ по эвакуации из вышележащих этажей людей, которым угрожает опасность отравления дымом. Это отвлекает силы пожарных частей от работ по тушению пожара.

В типовых проектах современных жилых и общественных зданий подобные решения исключены и подвальные помещения имеют обособленные выходы. Однако и в этом случае может иметь место проникновение дыма и распространение пожара в первый этаж здания в результате прогрева или повреждения тонкостенных железобетонных перекрытий, через неплотности в стыках плит или в местах пропуска трубопроводов санитарно-технических устройств. Прогрев перекрытия возможен в случае применения тонкостенных овалынопустотных или ребристых настилов. Если эти конструкции будут иметь повышенную влажность (свыше 4,5%), то при пожаре возможно ожидать взрывоподобного разрушения бетона и образования в настилах сквозных отверстий.

Из-за трудностей тушения пожары в подвальных помещениях отличаются значительной продолжительностью. Известны отдельные случаи, когда продолжительность пожара в подвальном помещении составляла 3—5 и даже 9—10 час. Однако примерно

80% всех подвальных пожаров прекращается в течение 2 час. или раньше.

Существует мнение о том, что обычные конструкции междуэтажных перекрытий не следует использовать в качестве надподвальных, поскольку последние должны обладать повышенным пределом огнестойкости. В то же время известно, что интенсивность горения при пожаре в подвале из-за недостаточного прито-

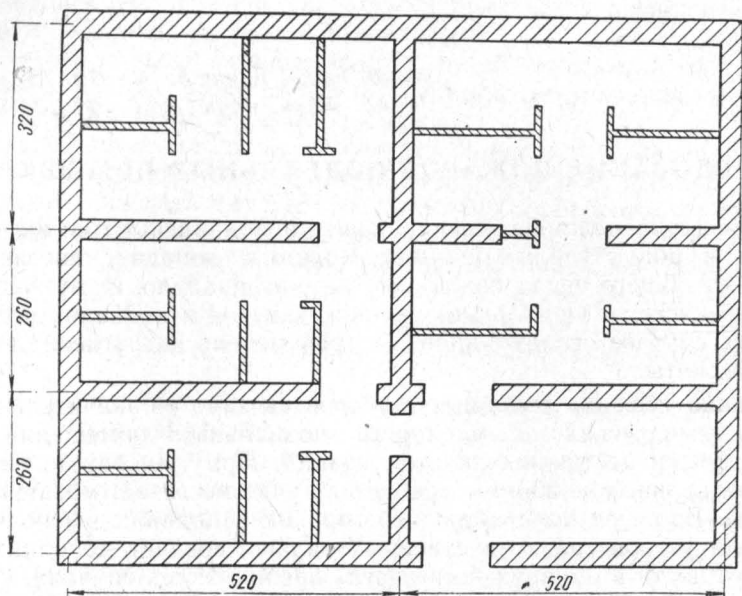


Рис. 1. План опытного здания.

ка воздуха в зону горения значительно ниже, чем при пожарах в помещениях, имеющих обычные оконные проемы. В связи с этим и температура при подвальных пожарах ниже, чем при пожарах в обычных помещениях.

Для выяснения температурного режима таких пожаров в ЦНИИПО были проведены специальные опыты.

Выбору объекта, пригодного для проведения экспериментов, предшествовало изучение типовых проектов современных жилых домов с подвалами. Учитывая размеры секций подвальных помещений, принятые в этих проектах, представилось возможным использовать для проведения опытов помещения с площадью 26,4 и 38,2 м<sup>2</sup> и высотой около 2,5 м. Как видно из рис. 1, левая секция опытного здания разделена на 3 отсека, а правая на два. Кроме того, в правой части имелась лестничная клетка, площадью 11,6 м<sup>2</sup>, с оконным проемом, расположенным на высоте 3,8 м.

Для упрощения работ по подготовке опытов были выбраны помещения с отметкой пола на уровне земли. Условия подваль-

ного пожара достигались путем уменьшения площади проемов в помещениях, которая в различных опытах составляла от 2,5 до 10% площади пола помещений.

Для определения количества горючих материалов, при котором следует проводить огневые опыты по выявлению температурного режима в подвальных помещениях, были обследованы подвалы жилых домов, используемые для хранения дров. Этими обследованиями было установлено, что количество дров, хранящихся на 1 м<sup>2</sup> площади таких подвалов, в среднем, составляет 84 кг. Кроме того, около 16 кг/м<sup>2</sup> древесины приходится на деревянные перегородки сараев. Таким образом, количество древесины, приходящееся на 1 м<sup>2</sup> площади пола подвального помещения, было принято равным 100 кг.

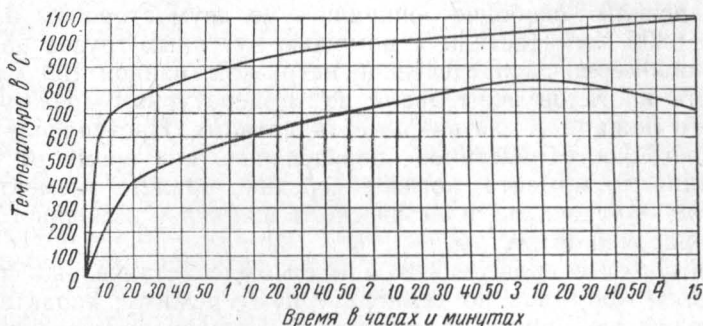


Рис. 2. Изменение температуры во времени при пожаре в опытном подвальном помещении и при стандартном режиме.

Для проведения опытов использовались сосновые бруски сечением от 30 × 40 до 50 × 100 мм с влажностью около 20%, укладываемые штабелями на полу сараев. Стенки сараев изготавливались из досок толщиной 25 мм. В левой секции опытного здания размещалось 12 сараев, а в правой — 6. В каждой секции на расстоянии 0,5 м от потолка размещалось 8—10 термомпар для измерения температуры во время опыта.

В подвальных помещениях было проведено четыре опыта. Во всех опытах было отмечено сравнительно медленное развитие пожара из-за недостаточного притока воздуха в зону горения. Одновременного горения на всей площади не наблюдалось. Пожар распространялся постепенно: от одного участка к другому. С уменьшением площади проемов снижались скорость выгорания горючего и температура в зоне пожара, а продолжительность пожара увеличивалась, достигая десяти часов в опыте с проемами, площадь которых составляла 2,5% от площади пола помещения. Температурный режим такого пожара изображен на рис. 2 нижней кривой. На верхней кривой рисунка для сравнения показан стандартный температурный режим, принятый для испытаний строительных конструкций на огнестойкость. Из этого рисунка видно, что при пожаре в подвале температура примерно на 300°



ниже, чем при стандартном температурном режиме. Путем сопоставления температурных кривых, изображенных на рис. 2, можно сделать вывод о том, что конструкции, испытанные по стандартному режиму, в условиях подвального пожара будут более длительное время сопротивляться воздействию огня, т. е. их фактическая огнестойкость окажется выше.

В связи с этим возникла необходимость испытания таких конструкций при температурном режиме пожара, протекающего в подвальном помещении. Для испытаний были выбраны два типа железобетонных настилов, широко применяемых в жилищном строительстве: круглопустотные, предварительно напряженные со стержневой арматурой класса А-III (НУ 59—12) и ребристые, предварительно напряженные с арматурой периодического профиля класса А-III (НРУ 59—12). При испытаниях на огнестойкость настилы свободно опирались по двум сторонам и имели пролет 5800 мм. Настилы с помощью чугунных грузов нагружались равномерно распределенной нагрузкой, равной 150 кг/м<sup>2</sup>.

Часть настилов испытывали по температурному режиму подвального пожара, а часть — по стандартному. Наступление предела огнестойкости настилов определялось как время от начала испытания до момента, когда в середине пролета элемента происходило образование пластического шарнира, вызванного текучестью рабочей арматуры.

В результате проведенных опытов было установлено, что при испытаниях настилов по температурному режиму, характеризующему развитие пожара в подвальном помещении, предел огнестойкости круглопустотных настилов, в среднем, был равен 2 час. 50 мин., а ребристых — 1 час. 40 мин. При испытаниях по стандартному температурному режиму таких же настилов предел огнестойкости их был соответственно равен 1 час. 20 мин. и 1 час. 10 мин., т. е. в два раза ниже, чем при испытании по температурному режиму подвального пожара. Аналогичные данные об огнестойкости настилов при различных температурных режимах были получены канд. техн. наук А. И. Яковлевым расчетным путем.

## Выводы

На основании изучения фактических данных о пожарах в подвальных помещениях и анализа проведенных экспериментальных работ по выявлению температурного режима пожара представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Температурный режим пожара, протекающего в подвальном помещении, значительно отличается от стандартного температурного режима, принятого для испытаний строительных конструкций на огнестойкость.

С уменьшением площади проемов подвального помещения температура помещения уменьшается. Продолжительность пожара при этом увеличивается.

2. Характерной особенностью подвальных пожаров является постепенное распространение пожара по площади помещения, так как из-за недостаточного притока воздуха одновременное горение по всей площади, как правило, невозможно.

3. Вскрытие отверстий в ограждающих конструкциях подвального помещения, а также открывание дверных и оконных проемов с целью выпуска дыма для облегчения тушения пожара, следует производить только при достаточном количестве сил для пожаротушения, так как преждевременное вскрытие проемов может вызвать интенсивное развитие пожара. В результате этого возможно повреждение перекрытий и распространение пожара в первый этаж здания.

4. В жилых и общественных зданиях II и III степеней огнестойкости во всех случаях возможно устраивать над подвалами неогороженные перекрытия с пределом огнестойкости один час, учитывая, что такие перекрытия выдерживают двухчасовое испытание по температурному режиму пожара подвального помещения.

5. В тех случаях, когда в подвальных помещениях жилых зданий высотой в три этажа и более размещаются дровяные или хозяйственные сараи, выходы из подвалов должны устраиваться только непосредственно наружу; устройство выходов из подвалов в лестничные клетки здания через шлюз допускать не следует, поскольку в большинстве случаев двери этих шлюзов оставляются открытыми, что в случае пожара в подвале приводит к задымлению лестничных клеток здания.

---

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИН ПОЖАРОВ, СВЯЗАННЫХ С ПЕЧНЫМ ОТОПЛЕНИЕМ**

Практика показывает, что разделение причин пожаров от печного отопления на причины, вытекающие из неправильного устройства печей и дымоходов и связанные с их неисправностью и несоблюдением правил пожарной безопасности при эксплуатации, не полностью раскрывает их существо.

Вместе с тем конкретность определенных данных необходима для выяснения причинной связи между фактом пожара и действиями лиц, виновных в его возникновении. Требование строгого соблюдения законности обязывает предельно точно устанавливать причину пожара в каждом отдельном случае. Иначе вина может быть квалифицирована неправильно и обвинение предъявлено необоснованно.

Обобщение практики проведения пожарно-технических экспертиз показывает, что причины пожаров от печного отопления целесообразно разбить на следующие четыре основных группы.

1. Возгорание частей зданий от непосредственного действия пламени, топочных газов, искр.

2. Возгорание и тепловое самовозгорание частей зданий в результате прогрева (перекала) исправных печей и дымоходов.

3. Возгорание и тепловое самовозгорание предметов и материалов, находящихся в помещениях около неисправных или перегретых отопительных приборов и дымоходов.

4. Возгорание частей зданий, предметов и материалов в результате теплопередачи через топочные и другие эксплуатационные отверстия печей и дымоходов.

В первой группе рассматриваются случаи, когда конструкции зданий и их отдельные элементы связаны с полостью отопительного устройства через случайные отверстия, трещины и неплотности в кладке печей, дымоходов и их разделок или введены внутрь отопительного устройства. Такая причина пожаров — одна из наиболее распространенных и является результатом не-

соблюдения условий пожарной безопасности при сооружении печей и дымоходов и при производстве строительных работ по зданию.

Пожары, возникающие по причинам второй группы, распространены меньше. Они являются результатом перегрева (перекала) печей, дымоходов и их разделок, находящихся в исправном состоянии. Кроме нарушений, допущенных при устройстве отопительных приборов (недостаточность разделок, отступок, закладка металлических элементов), в этих случаях приобретают особое значение и условия эксплуатации приборов — усиленная топка их.

Особенности третьей группы причин пожаров, возникающих от печного отопления, состоят в том, что в данном случае горение возникает и вначале распространяется не в частях зданий, а в помещениях, где находятся отопительные приборы и дымоходы. Основную роль в возникновении пожара — наряду с эксплуатацией отопительных приборов — здесь играют особенности размещения и содержания оборудования и материалов, находящихся в помещениях.

Причины пожаров четвертой группы по условиям образования и особенностям определения значительно отличаются от причин пожаров предыдущих трех групп. Эти причины пожаров представляют собой результат несоблюдения мер пожарной безопасности непосредственно при эксплуатации исправных отопительных приборов, очагов и отапливаемых ими зданий и помещений. Обычно, они не связаны с нарушениями правил устройства отопительных приборов.

Таким образом, рекомендуемой классификацией учитываются особенности нарушений вполне определенных правил пожарной безопасности, наиболее характерных для каждой из перечисленных четырех групп, что облегчает не только установление причин пожаров, но и лиц, виновных в их возникновении.

Рекомендуемая классификация могла бы быть учтена и при последующем, более конкретном анализе пожаров, происходящих от печного отопления.

Посмотрим, как распределение причин пожаров от печного отопления по таким группам может быть учтено при расследовании пожаров.

В начале расследования пожара причина возникновения его, как правило, еще не ясна. Но, если имеются веские основания в пользу одной из версий, то, как известно, и ее необходимо тщательно проверить, убедиться в правильности этой версии и мотивированно исключить другие предположения.

Обобщение опыта пожарно-технической экспертизы показывает, что причины возникновения пожаров успешно устанавливаются, если руководствоваться определенной системой такой работы.

Методика проведения этой работы предусматривает анализ трех следующих вопросов: выясняется обстановка, сложившаяся на месте до возникновения пожара, устанавливается очаг пожара, выдвигаются и проверяются версии о причине пожара.

Разные причины пожаров имеют присущие им особенности. Поэтому при расследовании пожаров, наряду с учетом общих положений методики этой работы, обязателен учет особенностей исследуемой причины. Правда, и в этом случае проверка версии осуществляется по той же «трехузловой» схеме.

Если выдвинута версия отопительного прибора, то наряду с точным определением места возникновения пожара, обычно требуется собрать ряд общих для данной версии сведений. Прежде всего нужны как можно более полные сведения о конструкции и особенностях устройства прибора и его дымоходов.

Особенно важно в таких случаях установить толщину и состояние стенок и разделок отопительного устройства на участке очага пожара.

Необходимо собрать данные об эксплуатации отопительного прибора, в частности о времени начала и окончания топки, ее продолжительности.

Получить достоверные сведения о характере, количестве и качестве топлива, данные, свидетельствующие о степени нагрева прибора.

К группе вопросов, характеризующих обстановку, предшествовавшую пожару, и условия развития его, следует отнести также сведения об устройстве и состоянии конструкций здания, о наличии определенных предметов и материалов на участке отопительного прибора, о возможных условиях аккумуляции тепла и горения в месте первоначального загорания.

Что же касается выдвижения конкретных версий о причине пожара их проверки, то, несмотря на то, что в данном случае речь идет лишь о пожарах, связанных с отопительными приборами и тому подобными очагами, непосредственных причин возникновения пожаров указанной категории, как мы уже знаем, существует несколько. Каждая имеет свои особенности.

Учет этих особенностей необходим не только для установления причины пожара, но и для выяснения причинной связи между фактом пожара и действиями лиц, виновных в его возникновении.

Отметим особенности установления рассматриваемых причин пожаров по группам.

**Первая группа.** Печи, патрубки, дымоходы и их разделки могут оказаться неисправными в результате неправильного выполнения кирпичной кладки (отсутствие перевязки швов, недостаточное их заполнение раствором, неправильное составление раствора), плохого качества кирпича или использовании для устройства печей и дымоходов дырчатого или пустотелого кирпича, некачественного соединения участков дымовых труб и каналов, выполненных из неодинаковых материалов.

Пожар может возникнуть также в результатах температурного расширения металлических элементов в кирпичной кладке печного устройства, осадки основания печи или дымохода, воздействия механических усилий на печи, патрубки и дымоходы, при завышенном теплонапряжении, а также вследствие длительной



эксплуатации, превышающей пределы естественного износа отопительного прибора.

Возможность нарушения прочности и плотности кирпичной кладки во всех случаях увеличивается при меньшей ее толщине, опасность возникновения пожара возрастает при усиленной топке отопительного прибора.

Характерной особенностью пожаров, возникающих по этой причине, является то обстоятельство, что начавшееся горение конструкций здания при неисправных отопительных приборах и дымоходах очень часто в первый период не обнаруживается. Подчас пожар замечают уже после того, как печь окончательно протопилась.

Это обстоятельство служит поводом, на первый взгляд, убедительным для лиц, не знакомых с особенностями пожаров, к исключению версии отопительного прибора. Объясняется это тем, что удаление дыма на первой стадии загорания, когда конструкция только тлеет, может происходить через ту же щель, трещину в дымоход. При загорании балок, заделанных в дымоходы, это отмечается наиболее часто.

Длительный период скрытого горения, иногда протекающего часами и даже сутками, кроме того, может определяться и условиями, неблагоприятными для горения: массивностью конструкций и плотностью их взаимной пригонки, наличием хорошо сделанной штукатурки, препятствующей доступу воздуха к очагу тления и распространению горения за пределы возникшего очага.

При загорании на чердачном перекрытии основной признак начавшегося пожара — дым — выделяется на чердак. Там он может быть не замечен до более значительного развития пожара. Происходит это и в тех случаях, когда очаг начавшегося пожара связан пустотами, имеющимися в конструкциях с атмосферой.

При установлении места возникновения пожара, его очага немаловажное значение имеют данные о времени, месте и характере первых признаков начавшегося пожара.

Признаками загорания, кроме запаха и появления дыма, могут быть местный прогрев, потрескивание тлеющих или горящих конструкций, появление желтоватого, а иногда более светлого пятна на оштукатуренной подшивке перекрытия около дымохода. В темноте возможно свечение штукатурки красным пятном.

При своевременно обнаруженном и удачно ликвидированном загорании расшифровка причин возникновения таких случаев, как правило, не представляет больших трудностей. Очаг пожара может быть очевидным. Внимательный осмотр места пожара позволит выявить неисправность отопительного прибора, ее характер, установить связь этой неисправности с положением очага. Обычно, очаговые признаки на конструкциях, бывающих в месте сближения или контакта строительных элементов с неисправным участком печи.

Проверка всех других версий, их обоснованное исключение, а также данные об особенностях эксплуатации печи перед пожаром

в совокупности с другими местными обстоятельствами позволяют сделать правильный вывод о причине возникшего загорания. Однако его причина может быть поставлена под сомнение, если печь или неисправный ее участок к моменту исследования не сохранились. Тогда приобретает особое значение мотивированное исключение других версий. Наряду с этим будет очень важно установить место первоначального загорания. Вывод о положении очага пожара может быть основан на осмотре обгоревших конструкций и показаниях очевидцев, которые могли видеть первые признаки загорания или осматривать печь до ее разборки. Все это нужно учесть и сопоставить с данными об эксплуатации отопительного прибора.

**Вторая группа.** В методах определения причин пожаров второй группы есть много общего с исследованием причин пожаров первой группы. Вместе с тем, в зависимости от того, возник ли пожар от неисправности или от прогрева исправного отопительного прибора, может устанавливаться ответственность разных лиц. Уже одно это обстоятельство обязывает при расследовании таких пожаров устанавливать причины их возникновения как можно более точно.

В этом случае установить и доказать причину пожара труднее, чем при наличии щелей, отверстий, неплотностей в кладке отопительного прибора и даже сам факт пожароопасного перекала нередко требует доказательств.

Особое значение при установлении такой причины пожара имеет обоснованное, четкое исключение других версий.

Возникновение пожаров от перекала исправных отопительных приборов может быть результатом иного, отличного от возгорания процесса. Пожар может быть следствием теплового самовозгорания деревянных и других сгораемых элементов сооружения. Самовозгорание, как известно, происходит в условиях относительно невысоких начальных температур. В сочетании с фактом исправности отопительного устройства это обстоятельство при неквалифицированном расследовании может вызвать сомнение в достоверности версии, привести к неправильным выводам о причине пожара. Поэтому при расследовании пожаров второй группы особенно важно иметь представление о механизме возникновения горения и о температурном режиме отопительного прибора.

Исследования, проводившиеся на Ленинградской пожарно-испытательной станции и в ЦНИИПО, показывают, что при сжигании дров температура в топливнике теплоемкой печи составляет около  $1000^{\circ}\text{C}$ . В дымоходе на уровне ближнего перекрытия через 3—6 час. усиленной непрерывной топки температура может достигать  $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ . При обычных топках она будет значительно ниже.

При температурном режиме отопительного прибора относительный прогрев кладки стенок печей, дымоходов и их разделок в том случае, если они исправны, не превышает величин, представленных в таблице.

Толщина кирпичной кладки в см	Максимальный относительный прогрев в % от температуры топочных газов
6,5—7,0	50—60
12—14	35
20	25
25	20
38	10

Следует напомнить также и о значительном времени, необходимом для прогрева исправных стенок и разделок отопительного устройства. Максимальный прогрев может наступить через 4—8 час. после начала топки, т. е. уже после того, как печь протопилась и труба закрыта.

Если учесть, что возникшее затем горение, протекающее вначале в виде тления, в свою очередь, может быть обнаружено не сразу, то становится очевидным, что значительное время, отделяющее момент обнаружения пожара от периода топки печи и для этой группы причин пожаров является характерным. Именно это обстоятельство, наряду с отсутствием видимых повреждений, иногда дает повод оспаривать и сам факт перекала. В таких случаях для проверки возможности загорания нередко принимаются решения о проведении эксперимента или расчета.

Для правильной постановки опыта или проведения расчета нужно располагать точными данными об условиях, в которых возник пожар. К таким данным следует отнести сведения о конструкции печи, размерах, устройстве и состоянии отдельных ее частей, о количестве и качестве топлива, сожженного в период топки, и продолжительности этой топки.

Важно точно установить размеры разделок, отступок, изоляций и расстояний между печью, дымоходом и сгораемыми элементами так же, как и данные о наличии и характере конструкций, горючих материалов, которые могли оказаться около отопительного устройства.

При загорании в месте прохождения патрубка перекидного рукава дымохода могут быть важными данные о наличии и толщине слоя сажи. Сажа — плохой проводник тепла, что оказывает влияние на условия передачи тепла на сгораемые конструкции и материалы, бывшие около отопительного прибора. Все это нужно устанавливать с учетом конкретных обстоятельств случая.

**Третья группа.** Загорание обстановки, оборудования, одежды, товаров, материалов может быть длительное время не замечено только в том случае, если помещение оставлено без надзора. Чаще подобные пожары обнаруживаются в начальной стадии и тогда установление их причин большой сложности не представляет.

Наряду с выяснением особенностей устройства и эксплуатации отопительного прибора, необходимо установить, что было в здании, в помещении, в котором возник пожар. Определяя очаг пожара, его зону, целесообразно составить схему размещения оборудования, мебели, предметов и материалов, находившихся в

зоне горения и, особенно, около отопительного прибора. Предварительное уточнение обстановки, в которой возник пожар, как известно, облегчает установление очага пожара. Если около печи находилась, например, одежда, то следует уточнить ее расположение, возможность сближения с печью, продолжительность и особенность контакта. Последнее очень важно. Поверхность печи нагревается сильнее в том месте, где она чем-либо закрыта. Условия теплоотдачи ухудшаются и соответствующий участок отопительного прибора может нагреться до температуры самовоспламенения материалов. При температуре менее высокой, чем температура самовоспламенения, но при длительном ее действии, возможно тепловое самовозгорание материалов, оказавшихся в контакте с отопительным прибором.

Следует подчеркнуть, что даже при нормальной эксплуатации отопительного прибора в месте его соприкосновения с материалами возможно развитие пожароопасной температуры. В жилых помещениях по этой причине наиболее часто загораются шкафы, реже — постельные принадлежности.

Если пожар ликвидирован своевременно, то по обгоранию стенки шкафа, обращенной к отопительному прибору — с ее внешней и внутренней стороны, по состоянию предметов, находившихся внутри шкафа, можно придти к выводу о положении очага пожара. Сопоставление этих данных с состоянием и характером эксплуатации отопительного прибора (при обоснованном исключении других версий) облегчит правильное определение причины пожара.

Обычно такие случаи происходят в отсутствие людей, почему и получают то или иное развитие. Но это позволяет поставить под сомнение или полностью исключить по фактору времени вероятность неосторожного обращения с огнем, несмотря на то, что предположение о зароненном огне в таких случаях выглядит вероятным.

Если пожар принял более значительные размеры и шкаф уничтожен огнем полностью, то при осмотре места пожара следует попытаться найти и разобрать остатки вещей, предметов, бывших в сгоревшем шкафу. При возникновении пожара от отопительного прибора вещи, находившиеся в шкафу, могут сохраниться лучше, чем при загорании, начавшемся внутри шкафа. Наряду с этим, если осмотр покажет, что после пожара не сохранились не только определенные вещи, но и их трудносгораемые или несгораемые детали, например, пуговицы и т. д., то целесообразно более тщательно исследовать вероятность хищения и поджога. Вывод о причине пожара следует делать по совокупности всех данных.

Нередко пожары этой категории происходят в результате контакта между материалами и дымоходами, находящимися в нежилых, вспомогательных помещениях. При расследовании таких случаев может возникнуть необходимость в разграничении ответственности между лицами, эксплуатирующими отопительный



прибор, лицами, отвечающими за его техническое состояние и лицами, которые обязаны обеспечивать пожарную безопасность в помещениях, правильное хранение материалов, содержание оборудования и т. д. Не всегда ответственность по всем этим направлениям ложится на одних и тех же лиц. Иногда она бывает связана с деятельностью даже различных организаций. Это обстоятельство может придавать делам о таких пожарах большую остроту, обязывает наиболее тщательно и всесторонне вести следствие. Версии, связанные с устройством отопительного прибора и его эксплуатацией рассматриваются параллельно с версиями, вытекающими из особенностей использования помещений.

В числе основных встречных версий проверяется вероятность внесения огня по неосторожности или с умыслом.

Примеры загорания сельскохозяйственных продуктов, кормов, сложенных около неисправных коренных труб, общеизвестны. В помещениях, используемых для хранения таких материалов, отходов, тары, где надзор недостаточен, горение нередко обнаруживается лишь после активного его развития. И если пожарные подразделения отсутствуют или недостаточно боеспособны, последствия пожара могут быть максимальными. Даже если здание в той или иной степени сохранилось, то многие признаки очага пожара могут быть уничтожены более значительными, обширными разрушениями при сгорании материалов. Поэтому, при установлении причин пожаров в таких случаях важную роль играют показания очевидцев о месте появления и характере замеченных ими признаков загорания. В первый период пожара, когда горят, главным образом, материалы, сосредоточенные около отопительного устройства, может быть полезным учет особенностей дыма — его запаха, цвета, если эти признаки специфичны для соответствующих материалов. В таких случаях целесообразно опросить наиболее широкий круг очевидцев, тщательно разобраться в обстановке, предшествовавшей пожару. Иначе место возникновения, а следовательно, и причина пожара могут остаться не установленными.

Версия загорания от дымохода или отопительного прибора может быть более очевидной, если будут установлены их неисправность, возможность прогрева, соответствующее положение очага. Когда очаг точно не устанавливается, то совпадение хотя бы зоны его с положением отопительного устройства будет свидетельствовать о вероятности такой версии.

Следует проверить, не было ли в очаге пожара материалов, склонных к самовозгоранию. В таком случае претензии к лицам, отвечающим за устройство и состояние отопительного прибора, могут быть сняты, если прибор исправен и толщина его стенок соответствует правилам их устройства. Необходимо выяснить, были ли отступления от обычного режима эксплуатации отопительного прибора.

Если имеется предположение о возникновении пожара в результате сушки топлива, одежды, обуви и т. п. сгораемых пред-



метов и материалов, то и в этом случае следует руководствоваться той же системой проверки любых версий, применительно к их особенностям.

В данном случае учитывается и анализируется следующее:

1. Местные условия и причины, которые могли вызвать необходимость сушки. Достоверность факта сушки.

2. Количество материалов, их характер, особенности размещения. Устройство и надежность приспособлений для закрепления предметов в определенном положении во время сушки.

3. Соответствовало ли состояние отопительного прибора перед пожаром возможности загорания от него. Топилась ли печь, сколько времени, каким топливом. Исправность печи на участке возможного контакта с предметами, которые сушились.

4. Когда была окончена топка печи, закрыта труба. Когда и с какой степенью влажности начиналась сушка предметов. Сколько времени помещение оставалось без наблюдения.

5. Когда были замечены признаки загорания. Соответствовали ли признаки, по которым пожар был обнаружен, а также особенности развития пожара данной версии.

6. Наличие очаговых признаков на участке предполагаемого места возникновения пожара. Соответствие их данной версии.

7. Остатки сушившихся предметов, материалов. Их наличие, состояние. Соответствие характера обгорания, переугливания и тому подобных поражений предметов, материалов; вероятности возникновения пожара в результате их сушки.

8. Результаты исследования других версий о причине пожара.

9. Выводы о причине возникновения пожара по результатам сопоставления всех данных.

**Четвертая группа.** Выпадение горящего топлива, углей, вылет искр, действие лучистой теплоты на сгораемые предметы, материалы при открытой или неисправной топочной дверце — основная категория причин этой группы.

Сюда можно отнести также случаи, связанные с применением легковоспламеняющихся и горючих жидкостей при растапливании печей, а также пожары от искровыделения из дымовых труб. Уместно напомнить, что положение очага пожара около печи не дает права только по одному этому признаку заключить, что пожар возник от печи. Должны быть исследованы и вероятность неосторожного обращения с огнем при курении, версии самовозгорания, умышленного поджога и другие предположения, соответствующие обстоятельствам случая.

ГОСТ 4058—48 предусматривает обязательное устройство металлического листа, размером не менее 70×50 см на деревянном полу перед топочной дверцей, закрывающего участок пола и плитуса у стенки печи.

Практика, однако, показывает, что это требование соблюдается не всегда и даже при наличии исправного притопочного листа пожары могут возникать при следующих обстоятельствах:

когда на притопочном листе находятся горючие материалы, загорание которых от выпавших горящего топлива и углей может повлечь за собой прогрев листа и горение пола.

Развитие горения, возникшего под листом, не может быть интенсивным. Оно будет активнее, если пол неплотный и имеются щели, обеспечивающие доступ воздуха в зону горения;

когда горючие материалы, расположенные около печи, сложены и за пределами притопочного листа в количествах, достаточных для загорания пола или предметов, находящихся в помещении.

Минимально необходимое количество материалов, достаточное для дальнейшего развития начавшегося горения, зависит от конкретных условий, в частности, от особенностей загоревшихся материалов, а также от особенности предметов или конструкций, которые оказались на участке возникшего загорания;

когда в полу около печи имеются щели, через которые возможно попадание выпавших горящих углей под пол. В таких случаях учитывается вероятный характер горючей среды под полом;

когда печь топится каменным углем. Выпадающие из печи куски каменного угля, попавшие на сгораемый пол, могут вызвать загорание пола при отсутствии в очаге дополнительных горючих материалов. Даже небольшие куски горящего каменного угля, кокса способны достаточно долго оставаться в раскаленном состоянии;

когда для растапливания печи используется горючая или легковоспламеняющаяся жидкость.

К менее распространенным причинам пожаров этой группы относятся вылет искр и действие лучистой теплоты из топочных отверстий на конструкции, предметы и материалы.

Сказанное ориентирует в отношении вопросов, которые необходимо выяснить, устанавливая обстановку, предшествовавшую возникновению пожара около печи.

Пожары, связанные с воспламенением горючих материалов около топок печей, очагов, более характерны для учреждений торговли, мелких производственных предприятий и тому подобных объектов, где накапливаются отходы упаковочных материалов, горючие отходы производства, сжигаемые в печах, плитах, титанах. Горение в таких случаях иногда уже в самом начале развивается интенсивно.

При возникновении пожаров в рабочее время они быстро обнаруживаются и не требуют больших усилий для расшифровки. Нужно лишь объективно и тщательно проверить вероятность умышленных действий под видом неосторожности.

Запущенные пожары, возникающие по этой причине, чаще происходят в нерабочее время при отсутствии охраны, автоматически действующей сигнализации, некачественном несении службы работниками охраны. Последние иногда бывают и непосредственными виновниками пожаров, оставляя затопленные ими печи без наблюдения.

Выпадение горящих углей возможно и через зольник. При проверке такого предположения необходимо уточнить ширину отверстий колосниковой решетки, исправность ее, степень заполнения золой поддувала. Если оно переполнено, то падающие из топливника через колосниковую решетку угли легче скатываются на пол. Конечно, поддувало в таких случаях или не имеет дверцы, или она оставлена открытой.

Устанавливая вероятность возникновения пожара от искры, вылетевшей из топки, необходимо получить сведения о том, какие предметы и материалы находились около печи, о расстояниях от топочного отверстия до материалов, предметов, таких, например, как кушетки, драпированные тканями, постели, скатерти, занавески и т. д.

Нужно установить, была ли открыта дверца печи, ее положение относительно предметов, на которые могла попасть искра. Наличие и состояние экрана с внутренней стороны дверцы, перекрывающего ее отверстия. Требуется уточнить продолжительность отсутствия людей в помещении, в котором топились печь, положение охваченного огнем участка относительно печи в момент обнаружения пожара, внешние признаки загорания, каким топливом печь топились.

Характер горения разного топлива не одинаков. Известно, что среди хвойных дров встречаются так называемые «стреляющие» поленья. Лиственные дрова в этом смысле «спокойнее» хвойных.

Пожары от действия лучистой теплоты при открытых топочных дверцах происходят редко. К сказанному следует добавить, что даже при обоснованных, на первый взгляд, подозрениях в пользу такой версии, причиной пожара может быть вылет искр. В наиболее опасной зоне действие излучения резко меняется даже при небольшом изменении расстояния между предметом и печью. В непосредственной же близости от топки сгораемые предметы и горючие материалы помещаются очень редко.

Если постройка уничтожена огнем полностью, то вывод о причине пожара делается лишь по совокупности всех данных на основе исключения других версий. Однако и в таких случаях осмотр места пожара не стоит пренебрегать. При расчистке обгоревших остатков иногда можно установить, что полы здания, в основном, сохранились, но сгорели около печи со стороны дверцы. Правда, могут быть случаи, когда полы полностью выгорают.

Наряду с пожарами, возникающими на участках топочных дверец, известны случаи, правда более редкие, когда причиной пожара является загорание предметов или материалов, оказавшихся в непосредственной близости к прочистным отверстиям печей и дымоходов. ГОСТ 4058—48 (п. 29) не допускает устройства таких отверстий в трубах на чердаках зданий, где нет достаточного контроля.

При исследовании подобных версий наряду с установлением периода и режима топки отопительного прибора необходимо разобратся с устройством печи, расположением прочистных отвер-

ствий, наличием и состоянием у них дверец или крышек. Важно точно установить возможность и особенности сближения предметов обстановки, материалов с прочистным отверстием печи.

Использование легковоспламеняющихся жидкостей при растапливании печей нередко оказывается роковым для проявляющих такую неосторожность. Опасность становится почти неизбежной, если жидкость вносится в топку печи, которую уже пробовали растапливать, и в ней имеются тлеющие очаги. Внезапный выброс сильного пламени через топочные отверстия обычно поражает виновника происшествия. С выбросом пламени из топливника загораются расположенные поблизости предметы обстановки, оборудование, материалы.

При расследовании таких случаев причина возникновения пожара чаще устанавливается без особого труда. Показания и характерные поражения непосредственного виновника пожара, следы самой жидкости, имеющей характерный запах, свидетельства очевидцев дадут возможность сделать правильный вывод.

Но могут быть и обстоятельства, затрудняющие обоснованное установление такой причины пожара. Если, например, здание сгорит полностью, случай будет иметь смертельный исход для виновника загорания или, наоборот, он, не получив особых поражений при воспламенении жидкости, встанет на путь отрицания фактов, нужных для обоснованного вывода о причине пожара. Если виновник несчастного случая погиб на месте происшествия и, к тому же, без свидетелей, неизбежна проверка предположения об убийстве. К числу неотложных действий на месте пожара, особенно при наличии такой версии, нужно отнести осмотр печи, отыскание сосуда, в котором была жидкость.

При исследовании данной версии целесообразно проверить качество топлива, которым топилась печь. Сведения о повышенной его влажности будут свидетельствовать о возможности применения ЛВЖ. И, наоборот, если окажется, что в такой мере не было надобности, предположение будет поставлено под сомнение.

Пожар от искровыделения из дымовой трубы может произойти лишь при сочетании трех следующих условий. Прежде всего должен быть установлен факт, время и продолжительность искровыделения, выяснены особенности его. Во-вторых, необходимо исследовать условия, способствующие, затрудняющие или исключаяющие возможность попадания искр в очаг пожара. И, наконец, материалы или части сооружения на участке контакта с искрами должны быть способны загореться от такого источника поджигания, как искра. Отсутствие одного из перечисленных условий исключает возможность возникновения пожара по этой причине. Версия анализируется наряду с проверкой других предположений и, конечно, после того, как установлен очаг пожара или, хотя бы участок, в пределах которого он возник. Так на рекомендуемой классификации причин пожаров, связанных с печным отоплением, строится методика установления их.

См. также статью Кашаева  
в сбор. № 3 ф-та (1964г)

Инж. Е. Н. ИВАНОВ

## РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ОРОШЕНИЯ

При расчете автоматических установок для тушения пожаров распыленной водой целесообразно иметь данные о необходимом количестве воды, которое характеризуется интенсивностью орошения.

Под интенсивностью орошения понимается наименьшее количество воды в одну секунду, требуемое для эффективной противопожарной защиты на одном квадратном или погонном метре защищаемой поверхности.

Теоретический расчет интенсивности орошения производится по испарительной и охлаждающей способностям воды, вводимой в сферу горения материалов, в зависимости от рода горючих материалов, их теплотворной способности и скорости горения.

Важную роль в определении интенсивности орошения играет также и расчет температуры, потерь тепла в условиях пожара и количества воздуха, участвующего в процессе горения.

Тепловой баланс процесса горения твердого горючего материала при пожаре выражается следующим уравнением:

$$Q_n^p + i_2 + i_a = \Sigma q + \omega, \quad (1)$$

где  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания одного кг твердого горючего материала (количество тепла, выделяющееся при сгорании 1 кг материала в ккал/кг);

$i_2$  — теплосодержание горючего материала в ккал/кг;

$i_a$  — теплосодержание воздуха, участвующего в процессе горения в ккал/кг;

$\Sigma q$  — потери тепла на пожаре в ккал/кг;

$\omega$  — количество тепла, потребное для сгорания 1 кг горючего материала, еще не участвующего в процессе горения (тепло, расходуемое на развитие пожара в ккал/кг).

Низшая теплота сгорания материала может быть определена как экспериментальным путем, так и расчетом.



Для расчета низшей теплоты сгорания 1 кг твердого горючего материала пользуются формулой Менделеева:

$$Q_n^p = 81C + 300H - 26(O - S) - 6W \text{ ккал/кг}, \quad (2)$$

где  $C, H, O, S$  — процентное содержание углерода, водорода, кислорода, серы и влаги в горючем.

Количество тепла, выделяющегося в течение одной секунды с одного квадратного метра площади при пожаре, может быть найдено из равенства:

$$K = Q_n^p V \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}, \quad (3)$$

где  $V$  — средняя скорость выгорания горючего при пожаре в  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ ;

$Q_n^p$  — низшая теплота сгорания горючего материала в  $\text{ккал/кг}$ .

Для некоторых твердых горючих веществ значения средней скорости выгорания получены опытным путем [2; 5].

Скорость выгорания твердых материалов в начальной стадии развития пожара внутри помещения в значительной мере зависит от условий газообмена и продолжительности горения. Проведенные автором опыты в помещении с закрытыми проемами позволили установить, что в начальной стадии пожара (спустя 15—20 мин. с момента загорания) помещение было почти полностью заполнено дымовыми газами. Скорость выгорания древесины при этом более, чем в 2 раза была ниже значений, полученных опытами на установке камера—весы, имеющей хорошие условия газообмена.

Площадь очага пожара в рассматриваемый момент времени зависит от скорости распространения огня, места возникновения пожара, условий газообмена и т. д.

Пожар, возникший в центре массива горючих материалов, развивается приблизительно во все стороны от центра равномерно. Поэтому площадь пожара условно можно определить как площадь круга, радиус которого в рассматриваемый момент времени  $t$  будет равен  $R = v \cdot t$ , где  $v$  — линейная скорость распространения огня.

Теплосодержание 1 кг продукта горения, участвующего в процессе горения, определяется уравнением:

$$i_s = C_s \cdot t \text{ ккал/кг}, \quad (4)$$

где  $C_s$  — теплоемкость горючего материала в  $\text{ккал/град}$ ;  
 $t$  — температура горючего перед пожаром в  $^{\circ}\text{C}$ .

Количество тепла, вносимое в зону горения с воздухом:

$$i_s = \beta L_m \cdot C_s \cdot t_s \text{ ккал/кг}, \quad (5)$$

где  $\beta$  — коэффициент избытка воздуха, расходуемого на горение;  
 $L_m$  — теоретический вес воздуха, необходимого для горения 1 кг горючего;

$C_s$  — теплоемкость воздуха, равная  $(0,24 + 0,47 d_{\text{возд}})$ ;

$d_{\text{возд}}$  — влагосодержание воздуха.

Теоретический расход воздуха для горения твердого горючего материала составляет:

$$L_m = \frac{2,67C + 8H - O + S}{0,2358} \text{ кг}, \quad (6)$$

где 2,67 — коэффициент, характеризующий поглощение (в весовых частях) на сгорание одной весовой части углерода в углекислоту;

8 — коэффициент для получения веса кислорода при сгорании и обращении одной весовой части водорода в воду;

1 — коэффициент для получения веса кислорода, потребного для горения серы;

0,2358 — содержание кислорода в воздухе.

В условиях пожара фактическое количество воздуха на горение материалов может быть выше или ниже теоретического  $L_m$ .

Фактический расход воздуха при горении твердого горючего материала характеризуется коэффициентом избытка воздуха:

$$\beta = \frac{L_\phi}{L_m}, \quad (7)$$

где  $L_\phi$  — фактический расход воздуха для горения горючего материала.

Величина коэффициента избытка воздуха  $\beta$  при горении твердых горючих материалов в практических условиях пожара не определялась.

В известной технической литературе по этому вопросу приводятся различные и противоречивые предположения о его величине. Так, например, П. Г. Демидов [1] в разбираемых примерах принимает  $\beta = 1,4—1,7$ , Н. Я. Ройтман [2] дает значения  $\beta = 0,68—1,0$ , А. В. Кудряшов [3] находит  $\beta = 1,2—1,4$ .

Учитывая сравнительно высокую температуру отходящих дымовых газов во время пожара, можно предполагать, что условия горения при пожаре с достаточным притоком воздуха будут близки к горению в топках, поэтому с достаточной для практики степенью точности значение  $\beta$  можно принять равным 1,0—1,2. В подвальных помещениях и помещениях без проемов величина  $\beta$  может быть принята равной 0,68—1,0.

Потери тепла при пожаре складываются из следующих основных элементов:

$q_{d_2}$  — унос тепла дымовыми газами;

$q_{x.m}$  — коэффициент химической и механической неполноты горения, эти потери ориентировочно равны 4—6% от низшей теплоты сгорания материала.

$q_{ст}$  — потери тепла вследствие теплоотдачи от нагревания стен и проч.

Значительное количество тепла уносится из зоны пожара газообразными продуктами горения. Величина потерь тепла вследствие уноса дымовыми газами определяется формулой:

$$q_{d_2} = \Sigma m C_{d_2} t_{d_2} \text{ ккал/кг}, \quad (8)$$

где  $\Sigma m$  — сумма весовых количеств компонентов дымовых газов на пожаре;

$C_{\partial_2}$  — теплоемкость дымовых газов при температуре пожара перед тушением;

$t_{\partial_2}$  — температура дымовых газов.

Объем дымовых газов, возникающих в результате горения твердых веществ, рассчитывается по формуле:

$$V_{\partial_2} = (1,15\beta + 0,18) \frac{Q_n^p}{1000} \times \frac{100 - q_{x.m.}}{100}, \quad (9)$$

где  $V_{\partial_2}$  — объем дымовых газов в  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\beta$  — коэффициент избытка воздуха;

$Q_n^p$  — низшая теплота сгорания материала в  $\text{ккал}/\text{кг}$ ;

$q_{x.m.}$  — коэффициент химической и механической неполноты сгорания.

Весовая теплоемкость дымовых газов  $C_{\partial_2}$  для различных температур приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

°C	$\gamma$ кг/м <sup>3</sup>	$C$ ккал/кг · град
0	1,295	0,249
100	0,950	0,256
200	0,748	0,262
300	0,617	0,268
400	0,525	0,275
500	0,457	0,283
600	0,405	0,290
700	0,363	0,296
800	0,33	0,302
900	0,301	0,308
1000	0,275	0,312
1100	0,257	0,316
1200	0,240	0,320

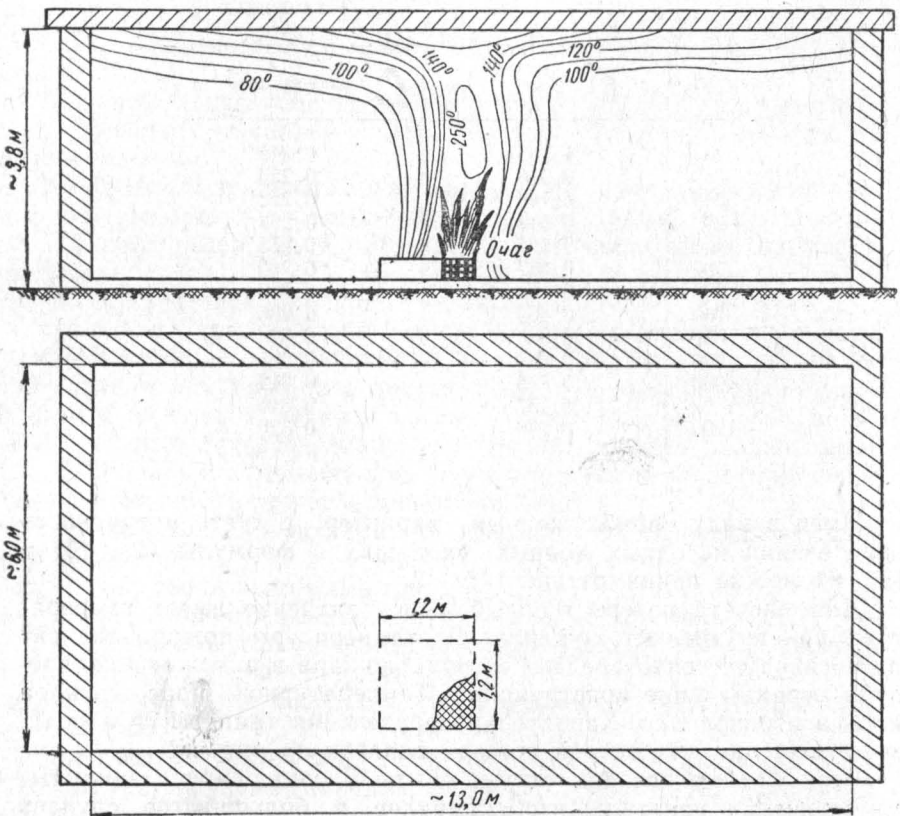
Имея в виду приближенный характер расчета и трудность определения исходных данных, входящих в формулы (2), (6) и (9), их можно принимать по табл. 2.

Для расчета потерь тепла большое значение имеет температура при внутренних пожарах. От температуры пожара зависит интенсивность теплопередачи из зоны пожара в окружающую среду и ограждающие конструкции. Температурное поле пожара весьма неоднородно. Характер распределения температур в объеме помещения для начала пожара показан на рисунке.

Приведенные автором статьи опыты в помещении с закрытыми проемами показали, что спринклер в большинстве случаев вскрывается спустя 15—20 мин. с момента возникновения пламени в штабеле древесины.

Таблица 2

Наименование материалов	Влажность в %	Расход воздуха для полного сгорания в $\text{м}^3/\text{кг}$	Полный объем дымовых газов в $\text{м}^3/\text{кг}$
Древесина (усредненные данные)	7	4,18	4,9
То же	20	3,61	4,4
»	40	2,84	3,75
Торф в караванах	40	3,01	3,87
» воздушносухой	11	4,5	5,18
Бумага, картон	12	3,42	4,21
Хлопок	4,5	3,75	4,52
Каучук натуральный	до 1,1	10,0	10,76
» синтетический СК-С	1	10,16	10,82
» неопределенный	0,8	6,2	6,4
Резина	1	9,97	10,52
Магний металлический	—	2,20	1,73
Парафин	—	11,58	12,57



Температурное поле пожара в помещении с закрытыми проемами.

Средняя температура в объеме помещения в это время составляет около 100—120°.

Средняя температура дымовых газов вблизи очага — около 250°. Температура массива ограждающих конструкций (перекрытий и стен) не превышает 30—50°.

Для прекращения горения следует искусственно уменьшить количество тепла, необходимое для развития пожара, до предела, при котором горение практически прекратится.

Это достигается путем введения в очаг горения капельных водяных струй. Уравнение процесса пожаротушения в элементарном виде можно записать так:

$$Q_{исп} + Q_{ох} \geq \omega \text{ ккал/кг}, \quad (10)$$

где  $Q_{исп}$  — количество тепла, отбираемое в результате испарения воды;

$Q_{ох}$  — количество тепла, отбираемое вытекающей водой;

$\omega$  — количество тепла, необходимое для развития пожара.

Количество поданной воды не используется полностью для прекращения горения. Вода, подаваемая на очаг пожара, частично испаряется, а частично нагревается и вытекает из зоны пожара.

Количество тепла, отбираемое в результате испарения 1 л воды, может быть найдено следующим образом:

$$Q_{исп} = \alpha [539 + (100 - t_{нач}) C] \text{ ккал/кг}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  — коэффициент использования воды при пожаре;

$t_{нач}$  — температура подаваемой воды.

Количество тепла, отбираемого водой, вытекающей из зоны пожара:

$$Q_{ох} = (1 - \alpha)(t_{отх} - t_{нач}) \text{ ккал/кг}, \quad (12)$$

где  $t_{отх}$  — температура отходящей воды.

Суммарное количество тепла, отобранное испарившейся и отошедшей водой, будет:

$$Q_{исп} + Q_{ох} = \alpha [539 + (100 - t_{нач}) C] + (1 - \alpha)(t_{отх} - t_{нач}) C \text{ ккал/кг}. \quad (13)$$

Коэффициент использования воды на пожаре  $\alpha$ , характеризующий отношение испарившейся воды к полному ее количеству, для большинства твердых сгораемых материалов может быть принят равным 0,3.

**Пример.** Определить интенсивность орошения для защиты склада деревянных моделей. Скорость выгорания древесины составляет 0,0156 кг/м<sup>2</sup>·сек. Низшая теплота сгорания древесины  $Q_n^p = 3500 \text{ ккал/кг}$ .

Теплосодержание древесины:

$$i_d = C_d \cdot t_d = 0,6 \times 20 = 12 \text{ ккал/кг}.$$

Количество воздуха, необходимое для горения 1 кг древесины:

$$L_m = \frac{2,67C + 8H - O + S}{0,2358} = \frac{2,67 \times 0,4033 + 8 \times 0,0497 - 0,3334}{0,2358} = 4,84 \text{ кг}.$$



Количество тепла, вносимое воздухом в зону горения:

$$i_b = \beta \cdot L_m \cdot C_a \cdot t_b = 1,2 \times 4,84 \times 0,25 \times 20 = 29,0 \text{ ккал/кг.}$$

Объем дымовых газов при сгорании 1 кг древесины:

$$V = (1,15\beta + 0,18) \frac{Q_n^p}{1000} \times \frac{100 - q_{xm}}{100} = (1,15 \times 1,2 + 0,18) \frac{3500}{1000} \times \frac{100 - 5}{100} = 5,6 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Вес продуктов горения:

$$\Sigma m = 1,29 \times 5,5 = 7,1 \text{ кг.}$$

Количество тепла, уносимое дымовыми газами ( $t_{d_2} = 250^\circ$ ) при сгорании 1 кг древесины (стадия развивающегося пожара):

$$q_{d_2} = \Sigma m C_p \cdot t_{d_2} = 7,1 \times 0,266 \times 250 = 470 \text{ ккал/кг.}$$

Тепловое излучение очага в помещении большого объема определяется количеством тепла, теряемого зоной пожара путем излучения. Принимая температуру излучающей поверхности —  $1000^\circ \text{K}$  и температуру ограждающих конструкций —  $320^\circ \text{K}$ , ориентировочно найдем количество тепла, потерянное с  $1 \text{ м}^2$  очага пожара в результате восприятия тепла окружающей средой и строительными конструкциями:

$$q_n = C_{\lambda} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,9 \times 4,9 (10^4 - 3,2^4) = 39700 \text{ ккал/м}^{-2} \text{ час}^{-1} = 11 \text{ ккал/м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

Химическую и механическую неполноту горения и т. д. ориентировочно выразим в размере 5% от  $Q_n^p$ :

$$q_{xm} = 0,05 Q_n^p = 0,05 \times 3500 = 175 \text{ ккал/кг.}$$

Количество тепла, необходимое для развития пожара:

$$\omega = Q_n^p + i_d + i_b - \Sigma q = 3500 + 12 + 29 - 470 - 175 = 2900 \text{ ккал/кг.}$$

Количество тепла, необходимое для развития пожара на  $1 \text{ м}^2$  площади в 1 сек.:

$$\Theta = V\omega - q_n = 0,6 \times 0,0156 \times 2900 - 11 = 16,2 \text{ ккал} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$$

Количество тепла, отобранное 1 л воды в результате ее частичного испарения и нагревания:

$$q_v = \alpha [539 + (100 - t_{нач})] \cdot (1 - \alpha) (t_{отх} - t_{нач}) = 0,3 [539 + (100 - 20)] + 0,7 (60 - 20) = 213 \text{ ккал/кг.}$$

Необходимое количество воды для ликвидации пожара на  $1 \text{ м}^2$  в течение 1 сек. (интенсивность горения):

$$I = \frac{\Theta}{q_v} = \frac{16,2}{213} = 0,076 \text{ л} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Отдельные положения в статье из-за отсутствия достаточно обоснованных данных носят приближенный характер. В связи с этим приведенный метод расчета следует рассматривать как пример обоснования расчетных расходов воды для пожаротушения, результаты которого достаточно удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демидов П. Г. Основы горения вещества. Изд. МКХ РСФСР, 1951.
  2. Ройтман М. Я. Пожарная профилактика в строительном деле. Изд. МКХ РСФСР, 1961.
  3. Кудряшов А. В. Определение противопожарных расходов воды. Инф. сборник ЦНИИПО «Пожарная профилактика», 1962.
  4. Брдлик П. М. и др. Теплоотдача. Изд. Московского лесотехнического института, 1956.
  5. Информационный бюллетень ЦНИИПО № 36, 1959.
-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

Исследование процессов горения твердых веществ имеет большое теоретическое и практическое значение для изучения возникновения и развития пожаров.

Ниже излагаются результаты исследования некоторых процессов пожара с использованием принципа воссоздания физических и физико-химических условий протекания этих процессов в условиях пожара. Изучались три процесса: возгорание материалов, тепловое самовозгорание и развившееся горение в очаге пожара. Исследования проводились под руководством канд. техн. наук С. И. Таубкина.

**Возгорание.** Огромное значение при возгорании материалов имеют не только свойства и состояние материала, но и условия аккумуляции выделяемого тепла. При исследовании возгораемости материалов по методу огневой трубы было замечено, что многие материалы, поджигаемые пламенем газовой горелки, после удаления источника поджигания быстро потухают, и поэтому принадлежность их к сгораемым материалам приходится устанавливать не непосредственно по их горению, а по ряду косвенных признаков, в частности, по потере веса образца более 20% и по наличию фазы самостоятельного пламенного горения более 1 мин.

Чтобы воспроизвести самостоятельное горение образцов сгораемых материалов после кратковременного огневого воздействия, была предпринята попытка обеспечить аккумуляцию выделяемого тепла путем испытания образца в условиях, затрудняющих передачу тепла в окружающую среду. Так возник метод огневых испытаний твердых материалов на возгораемость, названный условно методом керамической трубы.

В отличие от стандартного метода огневой трубы при этом методе материалы, относящиеся к группе сгораемых, после кратковременного местного огневого воздействия продолжают гореть самостоятельно и практически полностью сгорают (потеря органической части веса составляет не менее 70%). Таким образом,

метод керамической трубы является весьма наглядным и свидетельствует о большем соответствии условий испытания реальным условиям пожара.

Схема прибора для испытания показана на рис. 1. Прибор состоит из керамического короба размерами  $300 \times 120 \times 120$  мм, имеющего стенки толщиной 16 мм, оклеенные изнутри алюминиевой фольгой. Короб устанавливается на подставке. Внутри короба помещается газовая горелка внутренним диаметром 9 мм. Расход газа составляет около 0,7 л/мин (пропан-бутановая смесь).

Высота пламени регулируется в пределах 200—250 мм. Испытываемый образец размерами  $150 \times 60 \times 25 \div 30$  мм взвешивается, укрепляется в штативе и вводится в короб сверху при зажженной горелке так, чтобы от горелки до низа образца расстояние было равно 6 см. По прошествии двух минут подача газа в горелку прекращается, после чего наблюдается:

1) продолжительность пламенного горения образца после удаления источника поджигания;

2) продолжительность выделения дыма образцом;

3) момент самовоспламенения

(в случае отсутствия пламенного горения при удалении горелки), происходящий в результате самоускорения реакции разложения и окисления испытываемого материала.

После испытания образец выдерживается в приборе до полного остывания, затем повторно взвешивается и определяется процент потери веса.

Основными критериями оценки степени возгораемости материала по этому методу являются наличие фазы самостоятельного горения и процент потери органической части веса образца, характеризующий полноту сгорания материала.

По этому методу были испытаны материалы, относящиеся к различным группам возгораемости.

Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Метод керамической трубы позволил в лабораторных условиях воспроизвести характерное для некоторых высокопористых теплоизоляционных материалов явление: после прекращения действия источника поджигания у этих материалов самостоятельного пламенного горения не наблюдается, даже выделение дыма вначале быстро уменьшается и становится почти не заметным. Однако через некоторое время процесс тления постепенно активизируется, выделение дыма усиливается и, наконец, происходит самовоспламенение образца и полное его сгорание.

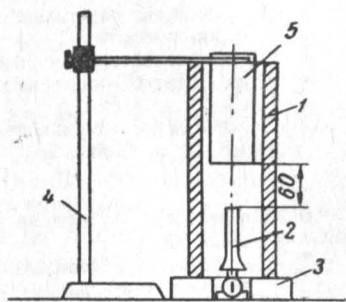


Рис. 1. Схема прибора для испытания материалов по методу керамической трубы:

1 — керамический короб; 2 — газовая горелка; 3 — подставка; 4 — штатив; 5 — образец.

Таблица 1

№ серии опыта	Материал	Группа возгораемости материала	Среднее значение процента потери органической части веса образца	Пределы колебания результатов в %	Количество опытов
1	Незащищенные торфоплиты	Сгораемый	100	0	4
2	Торфоплиты, содержащие 10% диаммонийфосфата	То же	94	±4	4
3	Торфоплиты, окрашенные смолой МФ	"	80	±6	3
4	Торфоплиты, окрашенные краской СК-Л за 1 раз	"	87	±2	3
5	Торфоплиты, окрашенные краской СК-Л за 2 раза	Трудновоспламеняемый	28	±0,5	3
6	Торфоплиты, оклеенные алюминиевой фольгой	"	19,2	±6	4
7	Сосновая древесина, пропитанная диаммонийфосфатом методом глубокой пропитки	Трудно-сгораемый	5,4	±1	4

**Тепловое самовозгорание.** Сущность ранее применяемого в ЦНИИПО метода исследования теплового самовозгорания твердых материалов состояла в воспроизведении явления самовозгорания образцов кубической формы, целиком помещаемых в среду с повышенной температурой [1]. Используя этот метод, удалось установить следующие зависимости между температурой окружающей среды, размерами образца и временем до его самовозгорания:

$$\lg t_c = A_p - n_p \lg x, \quad (1)$$

$$\lg t_c = A_s - n_s \lg \tau, \quad (2)$$

где  $t_c$  — минимальная температура окружающей среды, при которой наблюдается самовозгорание данного образца в °С;

$x$  — определяющий линейный размер образца в мм;

$\tau$  — время до самовозгорания в часах;

$A_p$ ,  $A_s$ ,  $n_p$ ,  $n_s$  — константы, определяемые опытным путем для каждого материала.

Выявление этих зависимостей производилось на образцах, имеющих форму куба, поэтому в качестве определяющего линейного размера была принята длина его ребра. При практическом использовании формул (1) и (2), если образец имел другую форму, в качестве определяющего размера предлагалось использовать минимальный линейный размер образца [2].

Для проверки правильности этого предложения была проведена серия опытов на образцах, имеющих форму параллелепипеда. Некоторые из полученных результатов приведены в табл. 2.



№ опыта	Размеры образца из незащищенных торфоплит	Температура термостата	Минимальная температура, при которой должно быть самовозгорание по формуле (1) в °С	Поведение образца при опыте
1	127 × 126 × 116	149	153	Самовозгорания нет
2	127 × 124 × 113	154	154	Самовозгорелся
3	304 × 149 × 75	155	171	"
4	300 × 200 × 26	178	222	"

Опыты показывают, что при форме образца, близкой к кубической, формула (1) дает хорошее соответствие расчетных и опытных данных (см. опыты 1 и 2). При изменении формы образца фактическая температура, при которой наступает самовозгорание, оказывается более низкой, чем по формуле (1). Например, для тонкой плиты (см. опыт 4) расхождение данных достигает 44° С, что совершенно не приемлемо.

Для объяснения полученных результатов и разработки метода расчета, который охватывал бы тепловое самовозгорание образцов произвольной формы, было сделано следующее предположение.

Процесс теплового самовозгорания определяется действием двух факторов: во-первых, наличием в образце при данной температуре экзотермических процессов (окисление, разложение и др.), приводящих к повышению его температуры; во-вторых, наличием процесса теплопередачи от образца в окружающую среду, поскольку между ними существует разность температур. При низкой температуре оба процесса находятся в равновесии и самовозгорания не наступает. При нагревании тела до температуры  $t_c$  и выше тепловое равновесие нарушается: тепла начинает выделяться больше, чем может отводиться в данных условиях. Начинается постепенный нагрев тела. Нагрев в свою очередь интенсифицирует экзотермические процессы, в силу чего скорость самонагревания постепенно возрастает. В определенный момент, когда температура в какой-либо точке тела достигает температуры самовозгорания, происходит скачкообразное увеличение интенсивности экзотермических процессов и возникает очаг тления или пламенного горения.

Из этой краткой схемы теплового самовозгорания не трудно понять влияние размеров образца на величину температуры  $t_c$ : чем больше размеры, тем более затруднен отвод тепла от центра образца, поэтому при более низкой температуре начинается прогрессирующее самонагревание, заканчивающееся самовозгоранием.

Однако если исходить из определяющей роли условий теплоотвода от центра образца, то необходимо учитывать не только

размеры образца, но и его форму, отношение поверхности тела к его объему. Известно, что скорость процесса теплоотвода для какого-либо тела тем больше, чем больше отношение его поверхности к объему. Следовательно, при форме тела, отличающейся от куба, большее приближение к действительности можно получить, если в выражении (1) вместо определяющего размера применить величину удельной поверхности тела.

Под удельной поверхностью ( $S$ ) понимают отношение полной поверхности ( $F$ ) тела к его объему ( $V$ ):

$$S = \frac{F}{V}. \quad (3)$$

Для вычисления величины удельной поверхности можно использовать также формулу:

$$S = 2 \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} \right), \quad (4)$$

где  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — соответственно толщина, ширина и длина тела в м.

Подставив значение  $S$  в формулу (1) и упростив ее, получим для искомой зависимости следующее выражение:

$$\lg t_c = (A_p - n_p) + n_p \lg S. \quad (5)$$

Полученная зависимость в случае кубической формы образца в точности соответствует формуле (1). Если форма образца отличается от кубической, то температура  $t_c$ , подсчитанная по формуле (5), ниже, чем по формуле (1), и ближе к опытным данным.

Таким образом, подсчет по формуле (5) более полно учитывает условия процесса теплового самовозгорания.

Предлагаемая зависимость еще нуждается в детальной проверке, но уже сейчас можно сказать, что она более приемлема для практики, чем формула (1).

#### **Определение скорости выгорания и удельной теплоты пожара.**

Под скоростью выгорания понимают весовое или объемное количество материала, сгорающее с единицы площади горения в единицу времени. Эта характеристика является одной из важнейших при изучении фазы выгорания. Зная закономерности изменения скорости выгорания в зависимости от рода материала и условий протекания процесса горения, можно более обоснованно говорить о температурном режиме пожара.

При разработке лабораторного метода определения скорости выгорания твердых веществ в условиях, приближенных к реальным, за исходное условие было взято горение одиночного образца. Чтобы исключить влияние случайностей в выборе размеров и формы образца, исследовалась кинетика разложения материала, и полученные результаты относились к единице поверхности горения. Как известно, горение материалов в условиях развившегося очага пожара коренным образом отличается от горения одиночного образца при обычных условиях. Тепло, выделяемое при горении одиночного образца, в значительной мере рассеивается в окружающей среде. Поэтому процесс идет со значительным за-

медлением и нередко прекращается, не дойдя до конца. Например, брусок древесины, подожженный с одного конца, в обычных условиях, как правило, не сгорает полностью, а лишь обугливается с поверхности на некоторую глубину, зависящую от величины импульса поджигания. В условиях развившегося очага пожара образец получает дополнительное количество тепла от соседних горящих образцов, причем при установившемся процессе это количество относительно стабильно. Приняв это во внимание, удалось создать для горения условия, близкие к реальным, поместив образец в открытую печь с накаливаемыми стенками. Конечно, в условиях пожара температура изменяется, но порядок температуры в очаге для многих материалов приблизительно одинаков и составляет 800—900° С. Этот температурный режим и был выбран в качестве рабочего при лабораторном определении скорости выгорания.

Горение большинства твердых материалов проходит две стадии: пламенного горения и тления угольного остатка. Интенсивность и длительность каждой из них зависит прежде всего от рода материала и условий протекания процесса. Скорость реакции пламенного горения определяется скоростью наиболее медленного процесса. У большинства твердых материалов такими процессами являются термическое разложение материала и диффузия летучих из массы материала в зону горения.

При горении пористых материалов скорость диффузии летучих превышает скорость разложения материала. Это подтверждает ряд исследователей [3] и наши опыты. Таким образом, с достаточной для практических целей степенью точности можно предположить, что скорость реакции пламенного горения определяется скоростью термического разложения. Следовательно, скорость реакции определяется уравнением:

$$v = - \frac{dg}{d\tau}, \quad (6)$$

где  $v$  — скорость изменения концентрации вещества, в данном случае скорость выделения летучих в г/см<sup>3</sup>·сек;

$g$  — концентрация вещества, в данном случае концентрация летучих в разлагающемся материале в г/см<sup>3</sup>;

$\tau$  — время в сек.

Поскольку термическое разложение целлюлозных и им подобных материалов можно представить как суммарную реакцию первого порядка, можно записать:

$$v = kg, \quad (7)$$

где  $k$  — константа скорости реакции в 1/сек.

Сопоставляя (6) и (7), получаем

$$- \frac{dg}{d\tau} = kg. \quad (8)$$

Решив полученное дифференциальное уравнение (8), для данного случая получим:

$$\ln \frac{g_0}{g} = k\tau, \quad (9)$$

где  $g_0$  — начальное содержание летучих в разлагающемся материале в г/см<sup>3</sup>.

За начальное содержание летучих  $g_0$  с достаточной степенью точности можно принять количество летучих, выделившихся к моменту прекращения пламенного горения. Поскольку процесс разложения при температурах 800—900°С протекает с большой скоростью, влиянием окисления образующегося угля в период активного пламенного горения можно пренебречь и считать, что вес образца убывает исключительно за счет выделения летучих.

Для исследованных материалов, как показывает табл. 3, оба предположения вполне соответствуют литературным данным [4, 5].

Таблица 3

Материал	Выход летучих в % по весу	
	по литературным данным	по опытным данным
Торф . . . . .	70—75	72—79
Древесина . . . . .	80—85	83—87

Чтобы найти скорость пламенного горения, в зависимости от начальных условий и времени, необходимо значение  $g$  из выражения (9) подставить в формулу (7). Тогда получим:

$$v = kg_0 e^{-k\tau}. \quad (10)$$

Исходя из формулы (10), находим среднее значение скорости пламенного горения  $v_{cp}$  в промежутке времени от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ :

$$v_{cp} = \frac{g_0}{\tau_2 - \tau_1} [e^{-k\tau_2} - e^{-k\tau_1}]. \quad (11)$$

Полученное значение  $v_{cp}$  легко преобразовать в среднюю скорость выгорания  $n_g$ :

$$n_g = \frac{600v_{cp}v}{F}, \quad (12)$$

где  $n_g$  — средняя скорость выгорания материала в кг/м<sup>2</sup>·мин;

$v$  — объем образца в см<sup>3</sup>;

$F$  — площадь горения, в данном случае наружная поверхность образца в см<sup>2</sup>;

600 — множитель, учитывающий размерность величин.

Учитывая, что отношение поверхности образца к объему равно удельной поверхности тела, выражение (12) можно упростить:

$$n_g = 6 \times 10^4 \frac{v_{cp}}{S}, \quad (12, a)$$

где  $S$  — удельная поверхность тела в 1/м.

Важное значение имеет также и удельная теплота пожара — количество тепла, выделяемого при горении вещества с единицы поверхности в единицу времени.

Формула для определения удельной теплоты пожара  $K$  имеет вид:

$$K = m \cdot n_g Q, \quad (13)$$

где  $m$  — коэффициент полноты сгорания, зависящий от химического состава материала и условий газообмена между зоной горения и окружающей средой;

$Q$  — теплота сгорания горящих продуктов в ккал/кг при пламенном горении — летучих; при тлении — угольного остатка.

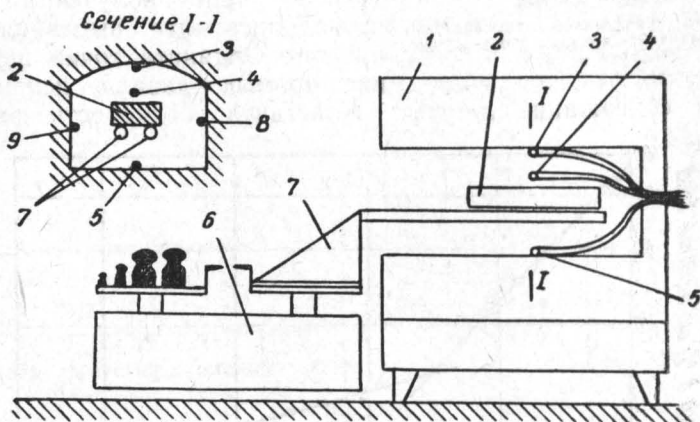


Рис. 2. Схема установки для определения скорости выгорания материалов:

1 — муфельная печь; 2 — образец; 3; 4; 5; 8; 9 — термопары; 6 — весы; 7 — кронштейн с салазками для установки образца.

Схема установки для исследования термического разложения твердых материалов показана на рис. 2. Муфельная печь мощностью 2,5 кВт имеет внутри четыре термопары, измеряющие температуру стенок печи и термопару, измеряющую температуру среды.

Перед началом каждого опыта печь нагревается при закрытой дверце до 930° С, затем дверца открывается, и весь опыт проводится при открытой печи. Изменение средней температуры стенок и среды в начальной стадии опыта (до воспламенения образца) показано на рис. 3.

Для испытания используются образцы размером 150×60××25 мм. Перед началом опытов для каждой серии образцов из одного и того же материала при помощи калориметра КЛ-1 определяется теплота сгорания  $Q_m$ . Перед сжиганием измеряются размеры образца с точностью до 0,1 мм и вес с точностью до 0,01 г. Затем образец устанавливается на фарфоровые салазки



(рис. 2) весов, уравнивается при помощи мелких разновесов и вводится в печь в момент, указанный на графике (рис. 3) точкой А. При опыте фиксируются:

1) момент воспламенения образца;

2) моменты потери веса образца через 5 г;

3) момент прекращения пламенного горения.

При обработке полученных данных вычислялись значения веса образца в различные моменты времени и наносились в полулогарифмических координатах на график (рис. 4). Через полученные точки проводились две выравнивающие прямые. Ордината точки пересечения прямых давала искомое начальное содержание летучих. Константа  $k$  скорости реакции

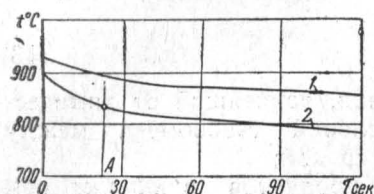


Рис. 3. График изменения температуры в муфельной печи при открытой дверце:

1 — кривая усредненной температуры стенок печи; 2 — кривая температуры воздуха в печи.

начальное содержание летучих.

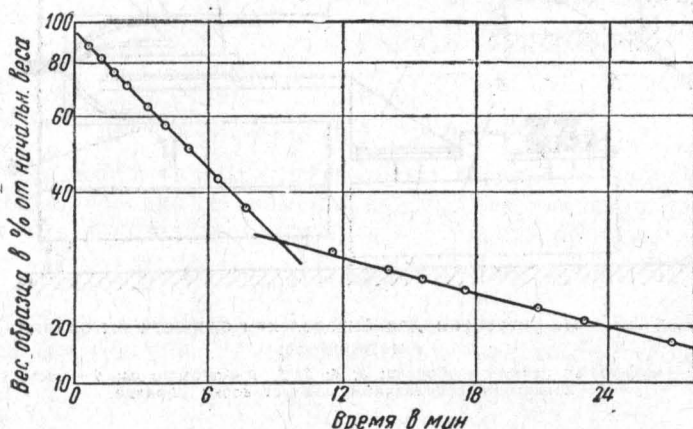


Рис. 4. Характер графика выгорания материала при опыте в муфельной печи (на примере древесины, подвергнутой глубокой пропитке).

определялась для каждой точки графика по формуле (9), приведенной для более удобного пользования к виду:

$$k = \frac{\lg \frac{G_o}{G_o - G_{cz}}}{0,434 \cdot \tau}, \quad (9, a)$$

где  $G_o$  — потеря веса образца к моменту прекращения пламенного горения в г;

$G_{cz}$  — потеря веса образца в момент времени  $\tau$  от начала горения в г;

$\tau$  — время от момента воспламенения в сек.

Полученные значения константы  $k$  усреднялись вначале в пределах каждого опыта, затем — в пределах всей серии опытов с одним и тем же материалом.

Для каждой серии образцов из одного и того же материала проводились контрольные опыты, отличавшиеся от остальных тем, что в момент прекращения пламенного горения образец выводился из печи и немедленно погружался в сосуд с холодной водой. Затем образец высушивался до абсолютно сухого состояния и на калориметре КЛ-1 определялась теплота сгорания угольного остатка  $Q_y$ . Теплотворность летучих определялась расчетным путем по формуле:

$$Q_a = \frac{Q_m - (1 - g_a) Q_y}{g_a}, \quad (14)$$

где  $Q_a$  — теплотворность летучих в ккал/кг;

$g_a$  — начальное содержание летучих в материале в кг/кг.

Результаты, полученные для ряда исследованных материалов, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика материала	Константа скорости реакции разложения в 1/сек	Средняя скорость пламенного горения в г/см <sup>2</sup> · сек	Средняя весовая скорость выгорания в кг/м <sup>2</sup> · мин	Удельная теплота пожара в ккал/м <sup>2</sup> · мин
Сосновая древесина с влажностью 7—9%, объемным весом 460—470 кг/м <sup>3</sup>	0,0062	0,00093	0,43	1670
Сосновая древесина, пропитанная (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> методом глубокой пропитки, объемным весом 510 кг/м <sup>3</sup>	0,0041	0,00053	0,29	740
Торфяные изоляционные плиты, влажностью 9—12%, объемным весом 130—140 кг/м <sup>3</sup>	0,017	0,00067	0,032	1140
Торфоплиты, защищенные от возгорания путем введения в массу по 10% (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> и битума в виде глино-битумной пасты, объемным весом 200 кг/м <sup>3</sup>	0,012	0,00052	0,28	1210
То же, но с введением в массу 20% (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , объемным весом 240 кг/м <sup>3</sup>	0,013	0,00064	0,28	1080
Торфоплиты, оклеенные со всех сторон алюминиевой фольгой при помощи смолы МФ, объемным весом 170—200 кг/м <sup>3</sup>	0,012	0,00049	0,22	810

Рассматривая приведенные данные, можно заметить, что скорость выгорания и, в особенности, теплоту пожара того или иного материала можно значительно снизить, применяя различные способы огнезащиты. Например, введение в древесину диаммоний-

фосфата в полтора раза снижает скорость выгорания и более, чем вдвое, удельную теплоту пожара. Значительно изменяются эти характеристики и у торфоплит, облицованных алюминиевой фольгой. Для этого материала при полигонных испытаниях макетов размером  $2,5 \times 1,0 \times 1,0$  м средняя скорость выгорания в период развившегося горения составляет так же, как и при лабораторных опытах,  $0,22 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{мин}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таубкин С. И. Основы огнезащиты целлюлозных материалов. Изд. МКХ РСФСР, М., 1960.
  2. Таубкин С. И., Баратов А. Н., Никитина Н. С. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов. Изд. МКХ РСФСР, М., 1961 г.
  3. Bamford C. H., Grane I., Malan D. H. The combustion of Wood. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1946. II. v. 42, pt. t, pp. 166—82.
  4. Линчевский В. П. Топливо и его сжигание. Metallurgizdat, М., 1959 г.
  5. Кнорре Г. Ф. Что такое горение? Госэнергоиздат, М.—Л., 1955 г.
-

## **МЕТОДИКА АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ПОЖАРА \***

### **(ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА РАЗВИТИЯ ПОЖАРА)**

#### **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

##### **1. Понятие о типе и схеме развития пожара**

В зависимости от места возникновения, размеров и формы участка, пожар может распространяться по-разному. Если он возник в центре достаточно большого массива горючих материалов, то огонь распространяется от очага во все стороны. Такое развитие называется круговым. Если пожар возник в одном из концов длинного и узкого участка, то развитие его носит односторонний характер. Если же пожар возник на границе достаточно большого массива, то развитие его происходит внутри некоторого угла  $\alpha$ , вершина которого — очаг, а стороны — границы участка. Тип развития пожара не остается постоянным. Пожар, начавшись как круговой, может затем перерасти в односторонний.

Схема развития пожара — это схематическое изображение района пожара с указанием направлений развития и этапов, когда развитие происходило по одному типу. Реальная геометрическая форма площади пожара несколько обобщается и выражается в виде геометрической фигуры правильной формы, наиболее близко подходящей к форме площади развивающегося пожара.

Если тип развития характеризует, каким закономерностям подчиняется развитие пожара на данном участке в данный момент времени, то схема развития показывает характер развития всего пожара в целом. В процессе пожара тип развития может быть различным на различных участках и в различные промежуточные времена, схема же развития для данного пожара может быть только одна.

В то же время схема развития более индивидуальна. Если типов развития только три: круговой, односторонний и угловой, то схем развития может быть бесконечное множество.

---

\* Основные положения методики анализа явлений, связанных с развитием пожара и его тушением, разработаны автором под руководством канд. техн. наук Н. А. Тарасова-Агалакова.

## 2. Основные и дополнительные геометрические параметры пожара

К основным параметрам относятся площадь пожара, площадь горения, периметр и форма площади. Развитие пожара выражается изменением его геометрических параметров. Чтобы глубже проникнуть в сущность явлений пожара, следует установить соотношения между параметрами при его развитии. Это позволит осуществить целый ряд расчетов, связанных с развитием пожара.

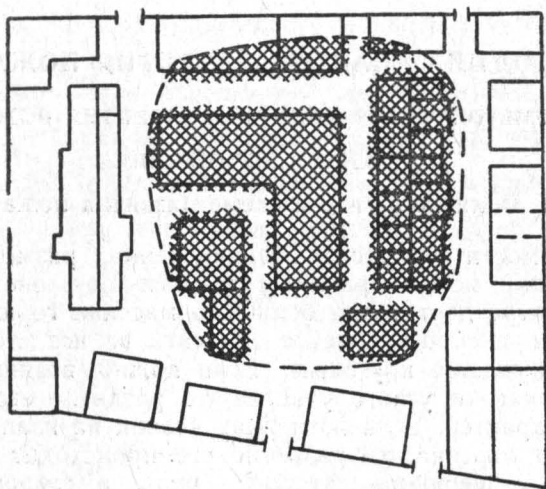


Рис. 1 Площадь пожара и площадь горения.

Дополнительные геометрические параметры — это условные геометрические характеристики, облегчающие анализ развития пожара; введение этих параметров упрощает сравнение различных пожаров между собой.

К дополнительным геометрическим параметрам относятся радиус пожара и коэффициент периметра — при круговом развитии, длина и ширина участка пожара — при одностороннем развитии, приведенный радиус пожара при развитии внутри угла  $\alpha$ . Дополнительным параметром при любом типе развития является главный периметр или периметр развития пожара.

Площадью пожара —  $F_n$  — называется площадь участка земной поверхности или пола помещения, на которой находятся горящие в данный момент здания и сооружения или их части. На рис. 1 — это площадь, заключенная внутри пунктирной линии.

Площадью горения —  $F_g$  — называется проекция зоны горения на площадь пожара и равна сумме площадей застройки, охваченных огнем зданий, сооружений или их частей. Если известен коэффициент застройки участка ( $\mu$ ), то от площади горения не трудно перейти к площади пожара, используя формулу:

$$F_n = \mu F_g. \quad (1)$$



Для внутренних пожаров понятия площадь пожара и площадь горения в большинстве своем совпадают.

Периметром пожара —  $P_n$  — называется периметр фигуры, образующей площадь пожара, другими словами, длина кривой, ограничивающей эту площадь.

Нередки случаи, когда нас интересует не весь периметр пожара, а только та его часть, где происходит дальнейшее распространение огня, которую можно назвать периметром развития или главным периметром.

Очевидно, что при круговом развитии главным является весь периметр пожара, так как распространение огня происходит в любой его точке; при развитии пожара внутри угла  $\alpha$  периметром развития является только часть, заключенная внутри угла. Границы участка пожара, образующие стороны угла, в периметр развития не входят, так как здесь никакого дальнейшего распространения огня не происходит. И, наконец, при одностороннем развитии главный периметр равен ширине участка пожара  $a$ :

$$P_{гп} = a. \quad (2)$$

В начальный период развития пожара форма площади целиком определяется типом развития: при круговом развитии она близка к кругу или эллипсу, при угловом — напоминает сектор и т. д. В дальнейшем, когда главный периметр встречается с границами участка пожара, площадь его формируется под влиянием двух факторов: типа развития и формы участка. В конечном счете, если пожар не локализуется, он принимает форму участка. Если интенсивность горения велика, то огонь может переброситься через разрыв на соседний участок, где, по существу, начинается развитие нового пожара.

При достижении на всем периметре развития эффективной удельной интенсивности подачи огнегасительных средств развитие пожара по площади прекращается, наступает так называемая теоретическая локализация, которая от практической отличается тем, что, хотя дальнейшее развитие пожара и приостановлено, но опасность еще не миновала, поскольку налицо мощный очаг огня. Для практической локализации необходимо создать условия, исключающие возможность дальнейшего распространения огня.

### 3. Скорость развития пожара

Скорость развития пожара является наиболее существенной характеристикой процесса его развития. Зная скорость развития, можно с успехом вести расчет необходимой скорости наращивания сил, средств для локализации и ликвидации огня. Однако в понятие скорости развития пожара иногда вкладывается различный смысл: одни понимают под ним скорость поступательного движения фронта пламени в каком-либо направлении, другие — скорость возрастания площади пожара. Поэтому, чтобы избежать

путаницы, введем определения, уточняющие понятие скорости развития пожара.

Скорость развития площади пожара  $v_n$  — это физическая величина, определяемая приращением площади его за единицу времени.

Если обозначить площадь пожара в момент времени  $\tau_1$  через  $F_{n_1}$ , а в момент времени  $\tau_2$  через  $F_{n_2}$ , то средней скоростью развития площади в промежуток времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  будет:

$$\overline{v}_n = \frac{F_{n_2} - F_{n_1}}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta F_n}{\Delta\tau}. \quad (3)$$

Чем меньше взят промежуток времени между определениями площади, тем ближе величина средней скорости  $\overline{v}_n$  к истинному значению скорости развития площади в данный момент времени  $\tau$ . Если взять предел средней скорости  $\overline{v}_n$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta\tau$ , то получим значение скорости в данный момент времени:

$$\overline{v}_n = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \overline{v}_n = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta\tau} = \frac{dF_n}{d\tau}. \quad (4)$$

Итак, скорость развития площади пожара есть первая производная от площади его по времени.

Пользуясь равенством (4), можно по известному закону изменения площади во времени определить скорость  $v_n$  для любого момента времени или же по известному закону изменения скорости  $v_n = \dot{f}(\tau)$  определить площадь пожара в любой момент времени по формуле:

$$F_n = \int_0^{\tau} v_n d\tau \quad (5)$$

или определить среднее значение скорости развития площади по формуле:

$$\overline{v}_n = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v_n d\tau. \quad (6)$$

Скорость развития периметра пожара  $v_p$  — это физическая величина, определяемая приращением периметра пожара за единицу времени.

Пусть в момент времени  $\tau_1$  периметр пожара равен  $P_{n_1}$ , а в момент времени  $\tau_2$  равен  $P_{n_2}$ , тогда средняя скорость развития периметра за промежуток времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  равна:

$$\overline{v}_p = \frac{P_{n_2} - P_{n_1}}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta P_n}{\Delta\tau}. \quad (7)$$

Истинное значение скорости развития периметра определяется как предел средней скорости  $\overline{v}_p$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta\tau$ :

$$\overline{v}_p = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \overline{v}_p = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta P_n}{\Delta\tau} = \frac{dP_n}{d\tau}. \quad (8)$$

Скорость развития периметра пожара есть первая производная от периметра пожара по времени.

Таким образом, если известен закон изменения периметра во времени, то применение формулы (8) дает возможность определить скорость  $v_p$  для любого момента времени.

## II. ОДНОСТОРОННЕЕ РАЗВИТИЕ ПОЖАРА

Односторонним называется такой тип развития пожара, когда распространение огня происходит только в одном направлении: параллельно границам участка, имеющего одну и ту же ширину. Одностороннее развитие обычно имеет место в узком длинном участке, как например, в отдельностоящих группах штабелей лесоматериалов, трибунах стадиона, сгораемых галереях, каравах торфа и т. д.

### 1. Схемы одностороннего развития

Основной схемой одностороннего развития пожара является прямоугольная схема. Одна из коротких сторон прямоугольника принимается за очаг возникновения пожара, распространение огня идет параллельно длинным сторонам участка (рис. 2). Разновидностями основной схемы являются схемы развития пожара, возникшего не на границе участка, а где-то в середине его. В этом случае мы имеем два самостоятельных периметра развития и два противоположных направления распространения огня. Такую схему, по-существу, можно считать сдвоенной основной схемой.

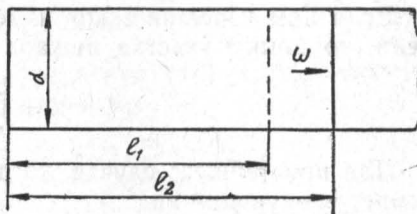


Рис. 2. Основная схема одностороннего развития пожара.

Более сложной схемой, приводимой к односторонней, будет схема развития пожара в узком криволинейном участке, имеющем небольшую кривизну. Для простоты рассмотрения такой криволинейный участок можно заменить прямолинейным, имеющим ту же ширину, с длиной, равной полусумме длин криволинейных сторон участка.

### 2. Линейная скорость распространения огня

Линейной скоростью распространения огня  $\omega$  называется физическая величина, измеряемая скоростью поступательного движения фронта пламени в данном направлении. Эта скоростная характеристика процесса развития пожара, по наблюдениям ряда исследователей, является наиболее стабильной величиной. При отсутствии тушения в целом ряде случаев было замечено даже, что линейная скорость на протяжении всего развития пожара не

изменялась. Более глубокие исследования этого важного для теории и практики пожаротушения вопроса не проводились.

Общие формулы для вычисления линейной скорости распространения огня выводятся из основной схемы одностороннего развития, рассмотренной выше. Пусть в момент времени  $\tau_1$  фронт развития пожара находился от очага возникновения на расстоянии  $l_1$ , т. е. длина участка пожара была равна  $l_1$ , а в момент времени  $\tau_2$  длина  $l_2$  (рис. 2). Тогда средняя линейная скорость распространения огня за промежуток времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  выразится формулой:

$$\bar{\omega} = \frac{l_2 - l_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta l}{\Delta \tau}. \quad (9)$$

Истинное значение линейной скорости в данный момент времени определится как предел средней скорости  $\bar{\omega}$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta\tau$ :

$$\omega = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \bar{\omega} = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta l}{\Delta \tau} = \frac{dl}{d\tau}. \quad (10)$$

Таким образом, линейная скорость распространения огня при одностороннем развитии пожара равна первой производной от длины участка пожара по времени.

Если нам известен закон изменения линейной скорости во времени, то длину участка пожара можно определить по формуле:

$$l = \int_0^{\tau} \omega d\tau. \quad (11)$$

Для простейшего случая, когда  $\omega = \text{const}$ , выражение (11) принимает следующий вид:

$$l = \omega \tau. \quad (11, a)$$

Формулу (11, a) можно применять для расчетов и в том случае, если мы пользуемся понятием средней линейной скорости  $\bar{\omega}$ .

### 3. Соотношение между геометрическими параметрами при одностороннем развитии пожара

Используя равенство (10), выведем основные соотношения между геометрическими параметрами в случае одностороннего развития пожара.

Соотношение между скоростью развития площади пожара и линейной скоростью распространения огня выведем, используя формулу (4):

$$v = \frac{dF_n}{d\tau}.$$

При прямоугольной схеме развития площадь пожара выражается уравнением

$$F_n = al. \quad (12)$$

где  $a$  — ширина участка пожара;

$l$  — расстояние от места возникновения пожара до фронта распространения огня (при развитии пожара эта величина является переменной).

Подставляя значение  $F_n$  из уравнения (12) в уравнение (4) и производя дифференцирование, получаем:

$$v_n = \frac{dF_n}{d\tau} = \frac{d}{d\tau}(al) = a \frac{dl}{d\tau} = a\omega.$$

Перепишав полученное выражение в виде отношения, получим искомое соотношение в виде

$$\frac{v_n}{\omega} = a. \quad (13)$$

Для вывода соотношения между скоростью развития периметра и линейной скоростью распространения огня используем формулу (8):

$$v_p = \frac{dP_n}{d\tau}.$$

Периметр пожара для принятой нами прямоугольной схемы развития выражается уравнением:

$$P_n = 2(a + l). \quad (14)$$

Подставляя значение  $P_n$  из уравнения (14) в формулу (8) и производя дифференцирование, получаем:

$$v_p = \frac{dP_n}{d\tau} = \frac{d}{d\tau}(2a + 2l) = 2 \frac{dl}{d\tau} = 2\omega; \quad (15)$$

окончательно  $\frac{v_p}{\omega} = 2$ .

Из уравнений (13) и (15) легко выводится соотношение между скоростями развития площади и периметра пожара:

$$\frac{v_n}{v_p} = \frac{a\omega}{2\omega} = \frac{a}{2}. \quad (16)$$

Из рассмотрения основной схемы одностороннего развития легко видеть, что величина главного периметра на протяжении всего процесса развития остается постоянной и равной ширине участка пожара:

$$P_{\text{гл}} = a. \quad (17)$$

Из этого простого геометрического факта следует важный тактический вывод: в силу неизменности периметра развития пожара локализация горения при одностороннем развитии теоретически достижима при любой малой скорости наращивания расходов огнегасительных средств. Каким бы медленным ни было наращивание расходов, рано или поздно интенсивность подачи возрастает до эффективной, и пожар будет локализован. Как будет



показано ниже, совершенно иначе обстоит дело при развитии пожара внутри угла  $\alpha$  и, тем более, при круговом развитии.

Опираясь на равенство (17), нетрудно рассчитать время теоретической локализации пожара. Если обозначить эффективную интенсивность подачи огнегасительных средств для локализации данного пожара через  $i_p$ , то суммарный расход при локализации ( $\Sigma q$ ) должен быть:

$$\Sigma q = i_p P_{2\lambda} = i_p \alpha, \quad (18)$$

тогда расчетное время локализации (от момента подачи первого ствола) может быть вычислено по формуле:

$$\tau_{\lambda} = \frac{i_p P_{2\lambda}}{v_i}, \quad (19)$$

где  $\tau_{\lambda}$  — расчетное время локализации пожара в мин.;

$i_p$  — эффективная интенсивность в л/сек·м;

$P_{2\lambda}$  — периметр развития пожара в м;

$v_i$  — практически возможная в данных условиях скорость наращивания расхода воды в л/сек·мин.

Площадь пожара в момент локализации можно определить, исходя из уравнений (11) и (12), по формуле:

$$F_n = a \int_0^{\tau_p} \omega d\tau, \quad (20)$$

где  $\tau_p$  — время от начала развития пожара до момента локализации в мин.

При  $\omega = \text{const}$  формула (20) легко интегрируется и принимает вид:

$$F_n = a\omega\tau. \quad (20, a)$$

Если линейная скорость переменна, решение возможно лишь когда известна зависимость

$$\omega = f(\tau),$$

определяемая уже не геометрическими, а физическими и физико-химическими параметрами процесса.

### III. КРУГОВОЕ РАЗВИТИЕ ПОЖАРА

Как уже указывалось, круговым развитием называется развитие пожара во все стороны от очага. В идеальном случае форма площади при круговом развитии действительно близка к кругу. Круговое развитие является более опасным, так как требует для локализации при прочих равных условиях значительно больше сил, чем одностороннее или угловое. Это объясняется тем, что в данном случае периметром развития является весь периметр пожара; при локализации такого пожара эффективную интенсивность необходимо обеспечить на каждом метре полного периметра, в то время

как при других типах развития силы требуется сосредоточивать только там, где в данное время происходит развитие пожара или имеется угроза развития.

## 1. Основные схемы кругового развития

Наиболее распространенными для кругового развития являются две основные схемы: круговая и эллипсоидальная (рис. 3).

Если линейная скорость распространения огня в каждый данный момент времени одинакова на любом направлении развития пожара, то для этого случая схема развития его может быть изображена в виде окружности. Если же в различных направлениях скорость распространения огня не одинакова, площадь пожара с течением времени принимает все более вытянутую овальную форму. В качестве геометрической схемы развития в данном случае удобнее всего принять эллипс, так как для эллипса проще установить соотношения между различными параметрами, чем для других математических фигур, напоминающих овал.

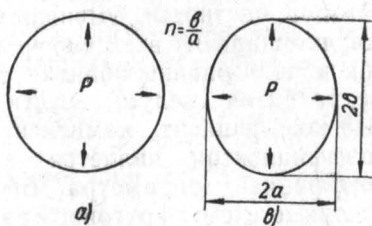


Рис. 3. Основные схемы кругового развития:

а — круговая; б — эллипсоидальная.

Какую из двух схем целесообразнее применить в том или ином случае зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от задачи, поставленной перед исследователем. Если исследуется реальный пожар, то вполне естественно, что выбирается схема, более близкая к реальной. Труднее обстоит дело, если ставится задача исследования возможного развития пожара в тех или иных конкретных условиях. При выборе схемы здесь приходится учитывать преобладающее направление, силу господствующих ветров, наиболее вероятные места возникновения пожара, плотность распределения горючих материалов по территории исследуемого участка, реальное развитие пожара в условиях, сходных с данными, и т. п. Готовых рецептов здесь дать нельзя, однако, как будет показано ниже, в тех случаях, где не требуется высокой точности, влиянием всех этих факторов на развитие пожара можно пренебречь и принять в качестве расчетной — круговую схему развития.

## 2. Дополнительные геометрические параметры при круговом развитии

Дополнительные геометрические параметры вводятся для облегчения раскрытия закономерностей развития пожара. При круговом развитии такими параметрами являются радиус пожара и коэффициент периметра.

Радиусом пожара —  $R$  — называется радиус круга, равновеликого площади пожара. Таким образом, зависимость между площадью пожара и радиусом выражается формулой:

$$F_n = \pi R^2, \quad (21)$$

откуда

$$R = \sqrt{\frac{F_n}{\pi}}. \quad (22)$$

В данном случае радиус пожара имеет вполне реальный смысл, являясь расстоянием от очага возникновения пожара до фронта распространения огня. В случае эллиптической схемы развития заменой эллипса окружностью мы искажаем принятую схему, причем не только форму, но и соотношения между параметрами, в частности, уменьшаем периметр, так как круг при данной площади из всех фигур имеет наименьший периметр. Значит, при использовании понятия радиуса пожара к эллиптической схеме развития следует ввести в уравнения некоторый поправочный коэффициент, компенсирующий изменение периметра. Таким коэффициентом является второй дополнительный параметр — коэффициент периметра. Введение его позволяет обобщить обе основные схемы кругового развития в один общий тип, применить к довольно сложной для вычислений эллиптической схеме развития простейшие законы круга.

### 3. Коэффициент периметра

Коэффициентом периметра —  $K_n$  — называется отношение периметра пожара к длине окружности, описанной радиусом пожара. Таким образом, уравнение, определяющее коэффициент периметра, имеет вид:

$$K_n = \frac{P_n}{2\pi R}. \quad (23)$$

Используя равенство (23), можно написать соотношение между площадью пожара и периметром в виде следующей зависимости:

$$P_n = 2 \sqrt{\pi} K_n \sqrt{F_n}. \quad (24)$$

Эта зависимость применима к любой схеме кругового развития: для идеально круговой формы площади  $K_n = 1$ , для иных форм  $K_n > 1$ .

Для большинства практических случаев кругового развития коэффициент периметра колеблется в пределах от 1,05 до 1,3.

Рассмотрим зависимость коэффициента периметра от размеров и формы площади пожара. Пусть площадь представляет собой эллипс с полуосями  $a$  и  $b$ . Если обозначить отношение полуосей через  $n$ , то площадь пожара может быть выражена следующим образом:

$$F_n = \pi ab = \pi a^2 n, \quad (25)$$

а периметр

$$P_n = \pi [1,5(a + b) - \sqrt{ab}] = \pi a [1,5(n + 1) - \sqrt{n}]. \quad (26)$$

Подставив значение  $F_n$  из формулы (25) в равенство (22), мы получим выражение для радиуса пожара в виде следующей зависимости:

$$R = \sqrt{\frac{F_n}{\pi}} = \sqrt{\frac{\pi a^2 n}{\pi}} = a \sqrt{n}. \quad (27)$$

Подставляя в уравнение (23) вместо  $P_n$  и  $R$  их значения из (26) и (27), получим:

$$K_n = \frac{P_n}{2\pi R} = \frac{\pi a [1,5(n+1) - \sqrt{n}]}{2\pi a \sqrt{n}} = 0,75 \frac{n+1}{\sqrt{n}} - 0,5,$$

Таким образом, формула для определения коэффициента периметра при эллипсоидальной форме площади имеет вид:

$$K_n = 0,75 \frac{n+1}{\sqrt{n}} - 0,5, \quad (28)$$

откуда видно, что коэффициент периметра зависит только от соотношения полуосей эллипса.

При небольшом изменении формы площади коэффициент периметра изменяется незначительно, даже при  $n$ , равном 2, т. е. при значительной вытянутости эллипса величина отличается от единицы всего на 9%. В большинстве практических расчетов этими девятью процентами вполне можно пренебречь, чтобы, не усложняя расчета, принимать коэффициент периметра, равным единице.

В том случае, когда пожар имеет неправильную форму, коэффициент периметра можно определить по формуле (24), преобразуемой для этой цели в более удобную форму:

$$K_n = 0,282 \frac{P_n}{\sqrt{F_n}}. \quad (29)$$

#### 4. Линейная скорость распространения огня при круговом развитии

При наблюдении реального пожара, а часто и при проведении эксперимента очень трудно, а подчас совершенно невозможно измерить величину скорости развития площади или периметра. В этих случаях единственной скоростной характеристикой, которую можно определить визуально или с помощью приборов, является линейная скорость распространения огня.

Определение линейной скорости было дано при рассмотрении одностороннего развития пожара. Это определение приемлемо и для кругового развития, однако для упрощения вывода формул здесь необходимо сделать некоторые пояснения. Как уже указывалось, при круговом развитии скорость распространения огня в различных направлениях может быть неодинаковой. Если это учесть, уравнения для линейной скорости принимают сложный вид и не удобны для использования. Для упрощения вида полу-

чаемых уравнений следует воспользоваться понятием усредненной линейной скорости, равной среднему арифметическому значению максимальной и минимальной скоростей распространения огня на различных направлениях в данный момент времени.

Установим зависимость линейной скорости распространения огня от других параметров пожара. Пусть в момент времени  $\tau_1$  площадь пожара была равна  $F_{n_1}$ , периметр  $P_{n_1}$ , радиус  $R_1$ , коэффициент периметра  $K_{n_1}$ , а в момент времени  $\tau_2$ , соответственно  $F_{n_2}$ ,  $P_{n_2}$ ,  $R_2$ ,  $K_{n_2}$ . Тогда приращение площади за промежуток времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  составит:

$$F_{n_2} - F_{n_1} = \bar{\omega} (\tau_2 - \tau_1) \cdot \bar{P}_n, \quad (30)$$

где  $\bar{\omega}$  — средняя линейная скорость распространения огня за промежуток времени  $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)$ ;

$\bar{P}_n$  — средняя величина периметра, равная

$$\bar{P}_n = \frac{P_{n_1} + P_{n_2}}{2} = \frac{2\pi (K_{n_1}R_1 + K_{n_2}R_2)}{2}. \quad (31)$$

Равенство (31) можно значительно упростить, если воспользоваться понятием среднего значения коэффициента периметра  $K_n$ .

Поскольку при небольшом изменении формы площади коэффициент периметра изменяется незначительно, можно считать коэффициент периметра на всем промежутке времени  $\Delta\tau$  постоянным и равным:

$$\bar{K}_n = \frac{K_{n_1} + K_{n_2}}{2}. \quad (32)$$

Применяя формулу (32), следует иметь в виду, что при  $\tau = 0$  и  $F_n = 0$  коэффициент периметра условно принимается равным единице. Заменив значения  $K_{n_1}$  и  $K_{n_2}$  в формуле (31) на  $\bar{K}_n$ , вычисленный по формуле (32), получим:

$$\bar{P}_n = \pi \bar{K}_n (R_1 + R_2). \quad (33)$$

Решив равенство (30) относительно  $\bar{\omega}$  и поставив в него значение  $\bar{P}_n$  из (33), получим:

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= \frac{F_{n_2} - F_{n_1}}{(\tau_2 - \tau_1) \bar{P}_n} = \frac{\pi (R_2^2 - R_1^2)}{\pi \bar{K}_n (\tau_2 - \tau_1) (R_1 + R_2)} = \frac{1}{\bar{K}_n} \cdot \frac{R_2 - R_1}{\tau_2 - \tau_1} = \\ &= \frac{1}{\bar{K}_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \tau}. \end{aligned}$$

Таким образом, формула для средней линейной скорости распространения огня имеет вид:

$$\bar{\omega} = \frac{1}{\bar{K}_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \tau}. \quad (34)$$

Истинное значение линейной скорости определится как предел средней скорости  $\bar{\omega}$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta\tau$ :

$$\omega = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \bar{\omega} = \lim \left( \frac{1}{\bar{K}_n} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \tau} \right) = \frac{1}{\bar{K}_n} \cdot \frac{dR}{d\tau}. \quad (35)$$



Следовательно, линейная скорость распространения огня при круговом развитии равна частному от деления первой производной от радиуса пожара по времени на среднее значение коэффициента периметра.

## 5. Соотношения между геометрическими параметрами при круговом развитии

При экспериментах, а также при обработке данных, взятых из описаний пожаров, чаще всего удается установить закон изменения во времени какого-либо одного геометрического параметра. Чтобы на этом основании установить закономерности изменения остальных параметров, необходимо знать, в каком соотношении находятся между собой различные параметры пожара.

Наибольший практический интерес представляют соотношения между скоростями. Вначале докажем, что линейная скорость распространения огня равна скорости развития площади пожара, деленной на периметр:

$$\omega = \frac{v_n}{P_n}. \quad (36)$$

Для доказательства перепишем формулу (36) в виде:

$$\omega = \frac{1}{P_n} \cdot \frac{dF_n}{d\tau}. \quad (36, a)$$

Теперь подставим в полученную формулу (36, a) вместо  $P_n$  его значение из уравнения (23) и вместо  $F_n$  значение из уравнения (21); проведя дифференцирование, получим:

$$\omega = \frac{1}{P_n} \cdot \frac{dF_n}{d\tau} = \frac{1}{2\pi K_n R} \cdot \frac{d}{d\tau} (\pi R^2) = \frac{2\pi R}{2\pi K_n R} \cdot \frac{dR}{d\tau} = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{dR}{d\tau},$$

т. е. получили уже известное нам равенство (35), чем доказывается справедливость равенства (36).

Выведем соотношение между скоростями развития площади и периметра пожара, опираясь на формулы (4), (8) и (24). Очевидно, чтобы выразить скорость развития периметра через площадь, достаточно значение периметра из формулы (24)

$$P_n = 2 \sqrt{\pi} K_n \sqrt{F_n}$$

подставить в уравнение (8) и продифференцировать полученное выражение. Строго говоря, выражение (24) следует дифференцировать как произведение двух функций, так как и  $K_n$  и  $F_n$  изменяются во времени. Однако решение задачи можно значительно упростить, если по формуле (32) вместо  $K_n$  поставить  $\bar{K}_n$ , которое является постоянной величиной на всем участке дифференцирования. Сделав эту замену, произведем дифференцирование:

$$v_p = \frac{dP_n}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} (2 \sqrt{\pi} \bar{K}_n \sqrt{F_n}) = \bar{K}_n \sqrt{\frac{\pi}{F_n}} \cdot \frac{dF_n}{d\tau},$$

$$\sqrt{\frac{\pi}{F_n}} = \frac{1}{R}, \text{ а } \frac{dF_n}{d\tau} = v_n;$$

тогда

$$v_p = \bar{K}_n \frac{1}{R} v_n \text{ или } \frac{v_n}{v_p} = \frac{R}{\bar{K}_n}. \quad (37)$$

Таким образом, при круговом развитии отношение скорости развития площади к скорости развития периметра равно радиусу пожара, деленному на среднее значение коэффициента периметра.

Уравнение (37) можно использовать для вывода соотношения между скоростью развития периметра и линейной скоростью распространения огня. Чтобы получить искомое соотношение, достаточно в равенство (36) подставить значение скорости развития площади  $v_n$  из уравнения (37):

$$\omega = \frac{v_n}{P_n} = \frac{1}{P_n} \cdot v_p \frac{R}{\bar{K}_n} = \frac{v_p R}{2\pi \bar{K}_n R \bar{K}_n} = \frac{v_p}{2\pi (\bar{K}_n)^2},$$

следовательно,

$$\frac{v_p}{\omega} = 2\pi (\bar{K}_n)^2. \quad (38)$$

Соотношения между различными геометрическими параметрами действительны не только для мгновенных значений входящих в них величин, но и для средних значений. В качестве примера выведем формулу для определения среднего значения линейной скорости распространения огня при условии, что

$$\bar{v}_n = \frac{F_n}{\tau}. \quad (39)$$

Очевидно, что

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{v}_n}{\bar{P}_n}. \quad (39, a)$$

Среднее значение периметра определим по формуле (31):

$$\bar{P}_n = \frac{0 + P_n}{2} = \frac{P_n}{2}.$$

Подставляя значение  $\bar{v}_n$  и  $\bar{P}_n$  в формулу (39, a), получим:

$$\bar{\omega} = \frac{2F_n}{P_n \tau}, \quad (40)$$

где  $F_n$  и  $P_n$  — соответственно площадь и периметр пожара в момент времени  $\tau$  от начала пожара.

Формула (40) предложена канд. техн. наук О. М. Курбатским. Хотя эта формула не является строгой, она может быть полезна при различных практических расчетах.

Приведенные выше уравнения кругового развития являются общими закономерностями, действительными как для переменных, так и для постоянных величин, входящих в эти формулы. Поэтому часть зависимостей выражена не в конечном, а в дифференциальном виде. Чтобы решить эти дифференциальные уравнения, требуется определить ряд зависимостей. Так, например, чтобы выразить периметр и площадь пожара через линейную скорость распространения огня, необходимо знать зависимость линейной скорости от времени. Рассматривая одностороннее развитие пожара, мы отметили, что в ряде случаев линейная скорость оказывается постоянной на протяжении значительных промежутков времени. Если предположить, что и при круговом развитии в некоторых случаях может встретиться такое же распространение огня, то имеет смысл говорить об уравнениях, раскрывающих соотношения между параметрами, при условии, когда  $\omega = \text{const}$ . Уравнения подобного рода представляют практический интерес также и потому, что они позволяют применить в ряде расчетов величины средней линейной скорости распространения огня, которые могут быть выявлены при анализе реальных пожаров.

Итак, выведем уравнения кругового развития пожара при условии, что:

$$\omega = \text{const}.$$

Уравнение радиуса пожара легко выводится из равенства (35):

$$\omega = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{dR}{d\tau}.$$

Разделяя переменные, имеем:

$$dR = \bar{K}_n \omega d\tau,$$

откуда

$$R = \int \bar{K}_n \omega d\tau = \bar{K}_n \omega \tau + C.$$

Значение постоянной интегрирования  $C$  найдем из начальных условий развития пожара:

при  $\tau = 0$  имеем  $R = 0$ , следовательно,  $C = 0$ .

Таким образом, уравнение радиуса пожара имеет вид:

$$R = \bar{K}_n \omega \tau \quad (41)$$

и представляет собой прямую, проходящую через начало координат.

Опираясь на уравнение (41), можно вывести уравнение площади. Как известно, площадь пожара при круговом развитии выражается формулой:

$$F_n = \pi R^2.$$

Подставляя в нее значение из (41), получим:

$$F_n = \pi (\bar{K}_n)^2 \omega^2 \tau^2. \quad (42)$$

Таким образом, уравнение площади пожара при круговом развитии представляет собой параболу, проходящую через начало координат.

Исходным уравнением для вывода уравнения периметра является:

$$v_p = \omega \cdot 2\pi (\bar{K}_n)^2.$$

Периметр и скорость развития периметра, как известно, находятся в соотношении (8):

$$v_p = \frac{dP_n}{d\tau}.$$

Разделив переменные и проинтегрировав, получим:

$$dP_n = v_p d\tau; P_n = \int v_p d\tau = \int \omega \cdot 2\pi (\bar{K}_n)^2 d\tau = 2\pi (\bar{K}_n)^2 \omega \tau + C.$$

Постоянная интегрирования находится так же, как и при выводе уравнения (41):

при  $\tau = 0$  имеет  $P_n = 0$ , следовательно,  $C = 0$ .

Итак, уравнение периметра пожара при круговом развитии имеет вид:

$$P_n = 2\pi (\bar{K}_n)^2 \omega \tau \quad (43)$$

и представляет собой прямую, проходящую через начало координат.

#### IV. УГЛОВОЕ РАЗВИТИЕ ПОЖАРА

В предыдущих главах были рассмотрены два крайних случая: одностороннее и круговое развитие пожара, но этими двумя случаями не исчерпывается все многообразие условий распространения огня. Вне рассмотрения остался многочисленный класс пожаров, развитие которых происходит не во все стороны, а только в направлениях, ограниченных некоторым углом  $\alpha$ . Закономерности развития геометрических параметров таких пожаров отличаются от рассмотренных выше. При этом типе развития пожара, являющемся наиболее общим, раскрываются характерные черты, присущие развитию всякого пожара. Многие закономерности этого типа развития могут быть распространены на другие типы развития. Таким образом, изучение углового развития пожара является важным этапом изучения развития пожара вообще.

При выводе уравнений углового развития используется схема, показанная на рис. 5, причем угол  $\alpha$  может быть любым, большим нуля и меньшим  $2\pi$ .

##### 1. Дополнительные геометрические параметры

При анализе этого типа развития пожара целесообразно ввести понятие приведенного радиуса, который определялся бы, как радиус кругового сектора, равновеликого площади пожара и имеющего центральный угол, равный углу развития  $\alpha$  (рис. 4).

Таким образом, первым дополнительным геометрическим параметром при этом типе развития является приведенный радиус пожара  $R_{np}$ , уравнение которого имеет вид:

$$R_{np} = \sqrt{\frac{2F_n}{\alpha}}. \quad (44)$$

Решая равенство (44) относительно площади пожара, получаем:

$$F_n = \frac{\alpha}{2} R_{np}^2. \quad (44, a)$$

Если приведенным радиусом пожара описать окружность, то получится известный нам случай кругового развития. Чтобы не усложнять исследования, предположим, что развитие внутри угла  $\alpha$  происходит так же, как и кругового, но не во все стороны,

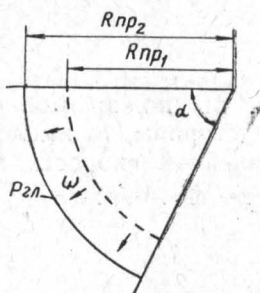


Рис. 4. Расчетная схема углового развития.

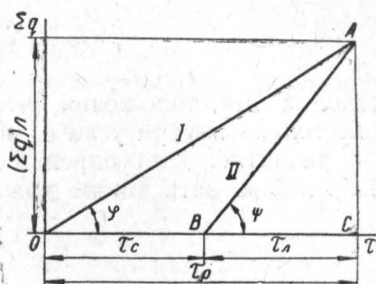


Рис. 5. К выводу уравнения локализации пожара.

а только внутри участка, ограниченного сторонами угла. В этом случае линейная скорость исследуемого пожара и приведенного кругового будут одинаковы:

$$\omega = \omega_{np} = \frac{dR_{np}}{d\tau}. \quad (45)$$

Равенство (45) является основным для вывода уравнений развития внутри угла  $\alpha$ .

Вторым дополнительным геометрическим параметром является периметр развития или главный периметр пожара. В рассмотренных ранее типах развития это понятие почти не применялось. При одностороннем развитии вместо него пользовались понятием ширины участка, а при круговом — периметром пожара. Иначе обстоит дело при развитии внутри угла. Здесь главный периметр имеет вполне самостоятельное значение и свои характерные особенности. С одной стороны, он как и при одностороннем развитии, составляет только часть полного периметра, но в то же время он как и полный периметр возрастает с увеличением площади. Вы-



яснение соотношений между главным периметром и другими параметрами пожара имеет существенное значение еще и потому, что именно с главным периметром связан вопрос локализации пожара — наиболее сложный вопрос тушения развивающегося пожара.

Из принятой схемы развития (см. рис. 4) видно, что главный периметр представляет собой дугу кругового сектора и поэтому может быть определен по формуле:

$$P_{г.л} = \alpha R_{np}. \quad (46)$$

## 2. Линейная скорость распространения огня

В предыдущем параграфе было отмечено, что основным уравнением линейной скорости распространения огня является уравнение:

$$\omega = \frac{dP_{np}}{d\tau},$$

выведенное в предположении, что, если бы пожар мог развиваться не только внутри угла  $\alpha$ , а во все стороны, то имелось бы круговое развитие. Для определения линейной скорости можно было бы использовать также более точную формулу:

$$\omega = \frac{1}{K_n} \cdot \frac{dR_{np}}{d\tau}. \quad (47)$$

Однако сложным является определение  $\bar{K}_n$  для случая развития пожара внутри угла. Повышение же точности расчетов формула (47) дает в данном случае несущественное. Поэтому в качестве определяющей взята более простая формула (45).

Очевидно, что среднее значение линейной скорости распространения огня в некотором промежутке времени можно определить по формуле:

$$\omega = \frac{R_{np_2} - R_{np_1}}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta R_{np}}{\Delta \tau}, \quad (48)$$

где  $R_{np_1}$ ,  $R_{np_2}$  — значения приведенного радиуса пожара соответственно в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

## 3. Соотношения между параметрами при угловом развитии

Прежде всего найдем соотношения между линейной скоростью распространения огня и остальными геометрическими параметрами пожара.

Скорость развития площади, как известно, определяется уравнением:

$$v_n = \frac{dF_n}{d\tau},$$

но при угловом развитии пожара площадь выражается формулой (44, а):

$$F_n = \frac{\alpha}{2} R_{np}^2.$$

Тогда

$$v_n = \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\alpha}{2} R_{np}^2 \right) = \alpha R_{np} \frac{dR_{np}}{d\tau} = \omega \alpha R_{np}. \quad (49)$$

Из формулы (46) следует, что  $P_{zA} = \alpha R_{np}$ , поэтому

$$\frac{v_n}{\omega} = P_{zA}. \quad (50)$$

Уравнение (50) является более общим, чем выведенное ранее уравнение (36), так как оно действительно для любого типа развития.

Скорость развития периметра определяется уравнением:

$$v_p = \frac{dP_n}{d\tau}.$$

Периметр пожара при развитии внутри угла  $\alpha$  равен:

$$P_n = R_{np} (\alpha + 2), \quad (51)$$

тогда

$$v_p = \frac{d}{d\tau} [R_{np} (\alpha + 2)] = (\alpha + 2) \frac{dR_{np}}{d\tau} = (\alpha + 2) \omega$$

или

$$\frac{v_p}{\omega} = \alpha + 2. \quad (52)$$

При данном типе развития значительную роль играет скорость развития главного периметра  $v_{zA}$ , определяемая приращением главного периметра за единицу времени.

Если в момент времени  $\tau_1$  главный периметр был равен  $P_{zA_1}$ , а в момент времени  $\tau_2$  равен  $P_{zA_2}$ , то средней скоростью развития главного периметра в промежутке времени будет:

$$v_{zA} = \frac{P_{zA_2} - P_{zA_1}}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta P_{zA}}{\Delta \tau}. \quad (53)$$

Истинная скорость развития главного периметра в момент времени  $\tau$  определится как предел средней скорости  $\bar{v}_{zA}$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta \tau$ :

$$v_{zA} = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \bar{v}_{zA} = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta P_n}{\Delta \tau} = \frac{dP_{zA}}{d\tau}. \quad (54)$$

Таким образом, скорость развития главного периметра равна первой производной от периметра развития по времени.

Подставляя в формулу (54) вместо  $P_{zA}$  его значение из (46), получим:

$$v_{zA} = \frac{d}{d\tau} (\alpha R_{np}) = \alpha \frac{dR_{np}}{d\tau} = \alpha \omega$$

или

$$\frac{v_{2A}}{\omega} = \alpha. \quad (55)$$

Если поделить почленно равенство (50) на равенство (55), то получим соотношение между скоростями развития площади и главного периметра:

$$\frac{v_n}{v_{2A}} = R_{np}. \quad (56)$$

Таковы основные соотношения между геометрическими параметрами при угловом развитии пожара.

## В. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ПОЖАРА

### 1. Расчет сил и средств, необходимых для локализации развивающихся пожаров

Как уже указывалось, развитие пожара теоретически прекращается, если на всем периметре развития будет достигнута эффективная удельная интенсивность подачи огнегасительных средств. Таким образом, суммарный расход воды (или другого огнегасительного средства), который фактически определяет необходимые силы, может быть определен по формуле:

$$\Sigma q = P_{2A} i_p, \quad (57)$$

где  $\Sigma q$  — суммарный расход воды в момент локализации в л/сек;  
 $P_{2A}$  — периметр развития в момент локализации в м;  
 $i_p$  — эффективная удельная интенсивность подачи воды на периметр в л/сек · м.

Проще всего применить формулу (57) для одностороннего развития пожара, так как при этом типе развития главный периметр есть величина постоянная и равная ширине участка пожара:

$$P_{2A} = a = \text{const}. \quad (58)$$

Таким образом, суммарный расход в момент локализации при одностороннем развитии пожара определяется по формуле:

$$\Sigma q = a i_p. \quad (59)$$

Для других типов развития использование формулы (57) затруднено тем, что неизвестно значение  $P_{2A}$  в момент локализации. Дело в том, что при круговом или угловом развитии главный периметр возрастает во времени, т. е. является функцией от  $t$ . Чем скорее локализуется пожар, т. е. чем меньше  $\tau_A$ , тем соответственно, при прочих равных условиях будет меньше и главный периметр  $P_{2A}$  и, следовательно, меньшие расходы потребуются для локализации пожара.

Но в то же время не вызывает сомнения и тот факт, что при малых скоростях наращивания расходов воды время локализа-

ции пожара возрастает. Поэтому, прежде чем вести расчет локализации пожара, выясним вопрос о влиянии скорости наращивания расхода на время локализации пожара.

Под скоростью наращивания расхода —  $v_i$  — принимается величина, которая измеряется приращением суммарного расхода за единицу времени. Так как расход воды через ствол принято измерять в л/сек, а время на пожаре — в минутах, то скорость наращивания расхода получает размерность — л/сек · мин.

Если в момент времени  $\tau$  суммарный расход на тушение пожара составлял  $\Sigma q_1$ , а в момент времени  $\tau_2$  был равен  $\Sigma q_2$ , то средней скоростью наращивания расхода в промежутке времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  будет:

$$v_i = \frac{\Sigma q_2 - \Sigma q_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{\Delta(\Sigma q)}{\Delta\tau}. \quad (60)$$

Скорость наращивания расхода воды в данный момент времени  $\tau$  может быть найдена как предел средней скорости  $v_i$  при неограниченном уменьшении промежутка времени  $\Delta\tau$ :

$$v_i = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta(\Sigma q)}{\Delta\tau} = \frac{d(\Sigma q)}{d\tau}. \quad (61)$$

Таким образом, скорость наращивания расхода есть первая производная от суммарного расхода воды по времени.

Теперь определим, какой должна быть требуемая скорость наращивания расхода, исходя из условий развития пожара.

Принимая эффективную интенсивность подачи воды или другого огнегасительного средства для данного пожара постоянной, имеем:

$$v_{i(mp)} = \frac{d(\Sigma q)}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} (P_{2\lambda} i_p) = i_p \frac{dP_{2\lambda}}{d\tau} = i_p v_{2\lambda}. \quad (62)$$

Однако требуемая скорость наращивания расхода обеспечит локализацию пожара только в том случае, если средства начинают подаваться сразу же после возникновения пожара. На практике между моментом возникновения пожара и моментом начала наращивания расходов всегда существует некоторый период свободного развития пожара  $\tau_c$ . Величина этого периода зависит от быстроты сообщения о пожаре, от времени следования боевых расчетов к месту пожара и времени их боевого развертывания. Подробное выяснение вопроса о времени свободного развития пожара составляет предмет самостоятельного исследования.

Поскольку силы вводятся с некоторым запозданием, равным  $\tau_c$ , то для того, чтобы локализовать горение, действительная скорость наращивания расхода  $v_{ig}$  должна быть тем больше, чем больше  $\tau_c$  и чем выше требуемая скорость  $v_{i(mp)}$ .

Когда  $\omega = \text{const}$ , эта зависимость легко выводится из рассмотрения рис. 5, на котором графически изображено в координатах  $\Sigma q - \tau$  наращивание суммарного расхода до момента локализации пожара. Прямая I — это график зависимости требуемого расхода от времени. Она выводится из уравнения:

$$\Sigma q = i_p \int_0^{\tau} v_{2A} d\tau, \quad (62, a)$$

которое вытекает из равенства (62). Очевидно, что при  $\omega = \text{const}$ , имеем  $v_{2A} = \text{const}$  и уравнение (62, a) решается без труда:

$$\Sigma q = v_{2A} i_p \tau. \quad (63)$$

Из уравнения (63) следует, что зависимость суммарного расхода от времени выражается прямой линией, проходящей через начало координат и имеющей такой угол наклона к оси абсцисс  $\varphi$ , тангенс которого равен  $v_{2A} v_i$ :

$$\text{tg } \varphi = v_{2A} i_p. \quad (64)$$

Если принять, что действительная скорость наращивания расхода  $v_i = \text{const}$ , то зависимость действительного расхода воды от времени также выразится прямой линией (на рис. 5 — это линия II). Уравнение этой линии выводится из равенства:

$$\Sigma q = \int v d\tau = v_i \tau + C, \quad (65)$$

вытекающего из соотношения (61). Постоянную интегрирования  $C$  найдем из условия, что при  $\tau = \tau_c$   $\Sigma q = 0$ , следовательно,

$$C = -v_i \tau_c.$$

Тогда уравнение действительного расхода приобретает вид:

$$\Sigma q = v_i \tau - v_i \tau_c. \quad (66)$$

Уравнение (66) представляет собой прямую, отсекающую на оси абсцисс отрезок, равный  $\tau_c$ , и имеющую такой угол наклона к оси абсцисс  $\psi$ , тангенс которого равен  $v_i$ , т. е.

$$\text{tg } \psi = v_i. \quad (67)$$

Локализация пожара возможна только в том случае, если прямые требуемого и действительного расходов пересекаются, так как только в этом случае действительный расход может достичь величины требуемого. Следовательно, непременным условием возможности локализации пожара является условие, чтобы угол  $\psi$  был больше угла  $\varphi$ , тогда:

$$v_i > v_{i(mp)} = v_{2A} i_p.$$

Таким образом, условие возможности локализации пожара можно записать в виде неравенства:

$$v_i > v_{2A} i_p. \quad (68)$$

Теперь установим зависимость между временем локализации пожара и другими параметрами, оказывающими влияние на ход локализации.

Из уравнения (63) следует, что

$$\Sigma q_A = v_{2A} i_p (\tau_c + \tau_2), \quad (69)$$



а из уравнения (66):

$$\Sigma q = v_i(\tau_c + \tau_A) - v_i\tau_c = v_i\tau_A. \quad (70)$$

Подставляя значение  $\Sigma q$  из (69) в (70), получаем:

$$v_i\tau_A = v_{2A}i_p(\tau_c + \tau_A),$$

откуда

$$\tau_A = \frac{v_{2A}i_p\tau_c}{v_i - v_{2A}i_p}. \quad (71)$$

Уравнение (71) можно назвать основным уравнением локализации пожара, так как оно раскрывает зависимость между всеми основными параметрами, оказывающими влияние на ход локализации пожара.

При использовании этого уравнения для решения различных практических задач следует помнить, что предпосылками для вывода его явились предположения, что, во-первых, скорость распространения огня не изменяется во времени, т. е. :

$$\omega = \text{const}$$

и, во-вторых, действительная скорость наращивания расхода — средняя величина, а не функция времени. Поэтому, если какая-либо величина будет задана в виде функции времени, например,  $v_{2A} = f(\tau)$ , то для подставки ее в формулу (71) необходимо вычислить вначале среднее значение, например, по формуле:

$$v_{2A} = \frac{1}{\tau_p - \tau_c} \int_{\tau_c}^{\tau_p} f(\tau) d\tau. \quad (72)$$

Временем развития пожара  $\tau_p$  в этом случае приходится задаваться ориентировочно.

Таким образом, более точно основное уравнение локализации пожара можно записать так:

$$\tau_A = \frac{v_{2A}i_p\tau_c}{\bar{v}_i - \bar{v}_{2A}i_p}. \quad (73)$$

## 2. Расчет сил и средств на тушение возможного пожара при составлении оперативного плана пожаротушения

При составлении оперативного плана наиболее трудным является определение размеров возможного пожара на данном объекте и связанный с этим вопрос о выборе и обосновании повышенного номера вызова сил и средств. До сих пор эти вопросы решаются, обычно, на основании опыта. Предлагаемый пример показывает возможность расчетного пути решения этих вопросов.

Открытый расходный склад деревообделочной фабрики занимает площадь 2 га. На складе имеется 2500 м<sup>3</sup> пиломатериалов (доски толщиной 2—5 см, влажностью 18—20%), уложенных в штабели группами по 8—12 штабелей каждая. Разрывы между штабелями 1—2 м, между группами — 8—12 м. Склад раз-

мещен в окружении одноэтажных деревянных жилых домов и сараев. Определим необходимость повышенного номера вызова при пожаре на данном объекте и ориентировочные размеры пожара в момент его локализации.

Исходные данные для расчета следующие:

расчетная средняя линейная скорость распространения огня  $\omega = 1,6 \text{ м/мин}$  (по данным ЦНИИПО);

первые стволы могут быть поданы через 6 мин. с момента вызова пожарной охраны, скорость наращивания расходов воды в среднем равна  $17 \text{ л/сек} \cdot \text{мин}$ ;

расчетная удельная интенсивность подачи воды для локализации пожара  $i_p = 1,3 \text{ л/сек} \cdot \text{м}$ ;

при выборе повышенного номера вызова иметь в виду, что по существующему расписанию выездов на данный объект по вызову № 1 прибывают два оперативных отделения, по вызову № 1-бис прибывают еще два оперативных отделения, по вызову № 2 и последующим прибывают по пять оперативных отделений (все отделения выезжают на автомобилях типа ПМЗМ-1 и ПМЗМ-2). Расчетный расход воды, обеспечиваемый одним насосом в данных условиях, можно принять равным  $36 \text{ л/сек}$ .

## Решение

1. Определение расчетной схемы развития пожара. В соответствии с тем, что в данном случае мы не можем знать заблаговременно тип развития пожара, принимаем в качестве расчетного наиболее невыгодный тип, а именно — круговое развитие пожара. Для простоты расчета полагаем  $K_n = 1$ , и тогда расчетной схемой может быть принята круговая схема (рис. 6).

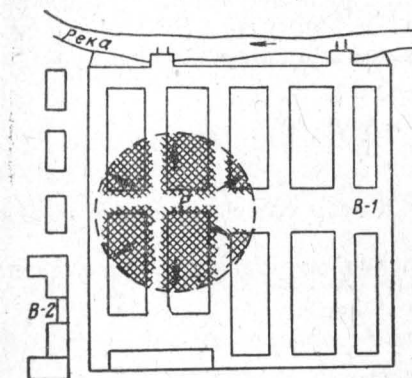


Рис. 6. Схема развития пожара (к составлению оперативного плана пожаротушения).

## 2. Определение средней скорости развития периметра $v_p$ .

По закону кругового развития пожара имеем:

$$v = 2\pi (K_n)^2 \omega,$$

тогда

$$v_p = 2\pi (1)^2 \times 1,6 = 10 \text{ м/мин}.$$

## 3. Определение расчетного времени локализации пожара $\tau_a$ .

Зависимость времени локализации пожара от различных факторов:

$$\tau_a = \frac{v_p i_p \tau_c}{v_i - v_p i_p}.$$

Подставляя числовые значения величин, входящих в данную формулу, получим:

$$\tau_A = \frac{10 \times 1,3 \times 6}{17 - 1,3 \times 10} \approx 20 \text{ мин.}$$

#### 4. Общий расход воды на тушение в момент локализации пожара $\Sigma q$ .

Расчетная формула для определения расхода воды имеет вид:

$$\Sigma q = v_i \tau_A,$$

тогда  $\Sigma q = 17 \times 20 = 340 \text{ л/сек.}$

При подаче от каждой машины в среднем 36 л/сек для тушения потребуется не менее 10 автонасосов.

5. **Определение площади пожара в момент локализации.** Для вычисления площади можно применить следующую формулу:

$$F_n = \pi [K_n \omega (\tau_c + \tau_A)]^2,$$

тогда

$$F_n = \pi [1 \times 1,6 (6 + 20)]^2 = 5400 \text{ м}^2,$$

что составляет около 27% площади склада.

6. **Определение необходимого повышенного номера вызова.** Как видно из п. 4, для локализации пожара требуется не менее 10 автонасосов. Кроме того, для создания некоторого резерва техники, а также для обеспечения тушения отдельных очагов загорания от разбрасываемых воздушными потоками горящих головней требуется еще не менее двух-трех автонасосов.

По вызову № 3 на пожар прибывают четырнадцать оперативных отделений. Таким образом, этот номер вызова является минимальным, обеспечивающим успешное тушение пожара на данном объекте.

В данном расчете исходили из наиболее жестких условий, предполагая, что огонь распространяется с неизменной скоростью до момента локализации пожара. В действительности, по мере наращивания расходов воды скорость распространения огня будет заметно снижаться, и локализация пожара наступит раньше, чем по расчету. Это дает дополнительные гарантии успешного тушения пожара.

Действительные скорости наращивания расходов воды могут быть определены при пожарно-тактическом учении на данном объекте с подачей максимального повышенного номера вызова сил и средств. Для каждого ствола по секундомеру определяется время с момента сообщения о пожаре на ЦППС до момента появления воды в стволе, и составляется сводный график наращивания расходов воды, который затем усредняется.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Журнал «Пожарное дело», 1962, № 1, стр. 19—20.
2. Пожарная безопасность новых производств химической промышленности. Изд. МХХ РСФСР, М., 1962, стр. 84—95.
3. Монахов В. Т. Пожар и явления его сопровождающие. Изд. Высшей школы МВД РСФСР, М., 1962.
4. Монахов В. Т. Справочные данные по горению, развитию и тушению пожаров. Изд. Высшей школы МООП РСФСР, М., 1963.
5. Журнал «Пожарное дело», 1963, № 1, стр. 19—21.

## СОДЕРЖАНИЕ

В. И. Блинов, В. Ч. Реутт, В. Е. Анисимов. Зависимость скорости сгорания жидкости от температуры на ее поверхности	3
А. Н. Баратов, В. М. Кучер. Прибор для определения пределов взрываемости паро-газовоздушных смесей	14
А. Н. Баратов, В. М. Кучер, А. Г. Прищеп. Исследование области взрываемости системы окись этилена — бромистый метил — воздух	18
А. И. Милинский. Принципы нормирования эвакуации людей из зданий массового назначения	21
В. А. Пчелинцев и В. С. Федоренко. Исследование пожаров подвальных помещений	35
Б. В. Мегорский. Классификация причин пожаров, связанных с печным отоплением	40
✓ Е. Н. Иванов. Расчет интенсивности орошения	52
В. Т. Монахов. Исследование процессов горения твердых веществ	60
В. Т. Монахов. Методика анализа развития пожара	71

### Пожарная профилактика и пожаротушение Информационный сборник

Тем. план 1963 г. № 147

Стройиздат

Москва, Третьяковский проезд, д. 1

Редактор В. А. Пчелинцев

Редактор издательства Л. А. Савранская

Техн. редактор В. В. Майоров

Корректор Л. В. Тюняева

Сдано в набор 9/1 1964 г.

Подписано к печати 5/V 1964 г.

Формат бум. 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub> д. л.

Печ. л. 6,0

3,0 бум. л.

Уч.-изд. л. 6,1

Т—05872

Изд. № 1710

Тираж 9000

Цена 31 коп.

Заказ 86

Московская типография № 28 Главполиграфпрома  
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,  
Москва, Е-398, ул. Плещева, 22

# ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
8	9 снизу	$\dots (-8,25 \times 1,0^{-3}$	$T) \dots (-8,25 \times \theta^{-3} T)$
66	1 снизу	$\dots$ в 1 м	$\dots$ в 1/м

Заказ 86