

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

**ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ  
ПО КУРСУ  
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА»**

**Москва 2010**

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

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

**ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ**  
**ПО КУРСУ**  
**«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**  
**РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА»**

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

Москва 2010

УДК 544  
ББК 38.96  
Б72

Рецензенты:

Доктор технических наук  
заместитель начальника ФГУ ВНИИПО России  
*С. Г. Цариченко*

Кандидат технических наук  
начальник отдела УГПН МЧС России  
*С. П. Воронов*

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

Б72 Примеры и задачи по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожара»: Учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. – 98 с.

ISBN

Учебное пособие предназначено для курсантов, слушателей и адъюнктов образовательных учреждений МЧС России пожарно-технического профиля.

УДК 544  
ББК 38.96

ISBN

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2010  
© Бобков С.А., Бабурин А.В.,  
Комраков П.В., 2010

## Глава 1

### ПАРАМЕТРЫ ПОЖАРОВ

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

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

$$p_{\text{гн}} = \frac{\sum m_i}{S}, \quad (1.1)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го горючего материала,  $\text{кг}$ ;  $S$  – площадь размещения,  $\text{м}^2$ .

*Площадь размещения* называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если горючие вещества и материалы находятся в помещении, не разделенном преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых меньше требуемых, площадь размещения равна площади пола.

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

$$g_{\text{гн}} = \frac{\sum m_i Q_{\text{ни}}}{S}, \quad (1.2)$$

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

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

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

*Площадь пожара*  $S_{\text{п}}$  – площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость.

*Площадь поверхности горения*  $S_{\text{пр}}$  – характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении, т. е. выделяет горючие газы

при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме.

*Коэффициент поверхности горения*  $K_{\Pi}$  – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{\Pi} = \frac{S_{\text{пг}}}{S_{\Pi}}. \quad (1.3)$$

*Линейная скорость распространения пожара*  $v_{\text{л}}$  – путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени, м/мин.

Величина  $v_{\text{л}}$  определяет площадь пожара на данный момент. Она зависит от вида горючего, характеристик пожарной нагрузки, вида пожара и других факторов.

*Массовая скорость выгорания абсолютная*  $v_{\text{м}}^{\text{абс}}$  – масса горючего вещества, сгорающая в единицу времени.

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

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}}/S_{\Pi}. \quad (1.4)$$

*Приведенная массовая скорость выгорания*  $v_{\text{м}}^{\text{пп}}$  – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$v_{\text{м}}^{\text{пп}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}}/S_{\text{пг}}. \quad (1.5)$$

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

$$q_{\Pi} = v_{\text{м}}^{\text{абс}} Q_{\text{н}} \beta, \quad (1.6)$$

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

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

Основными параметрами пожара газового фонтана являются:

*дебит*  $D$  – расход газа, выраженный в млн м<sup>3</sup> газа в сутки:

$$D \approx 0,0025 H_{\text{ф}}^2, \quad (1.7)$$

где  $H_{\text{ф}}$  – высота газового (нефтяного) фонтана, м;

коэффициент излучения факела  $f$ :

$$f = 0,05\sqrt{M}, \quad (1.8)$$

где  $M$  – средняя молярная масса компонентов горючей смеси, равная

$$M = \sum M_i a_i, \quad (1.9)$$

где  $M_i$  – молярная масса  $i$ -го компонента горючей смеси;  $a_i$  – доля  $i$ -го компонента в смеси;

плотность потока излучения из центра факела фонтана  $W$ , кВт/м<sup>2</sup>:

$$W = \frac{q_{\text{л}}}{4\pi R^2} = \frac{f Q_{\text{н}} \nu_{\text{г}}}{4\pi R^2}, \quad (1.10)$$

где  $R$  – расстояние от центра фонтана, м;  $q_{\text{л}}$  – интенсивность излучения, кВт;  $\nu_{\text{г}}$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;

интенсивность излучения  $q_{\text{л}}$ , кВт:

$$q_{\text{л}} = f Q_{\text{н}} \nu_{\text{г}}. \quad (1.11)$$

Табличные данные, необходимые для решения задач, приведены в приложениях 1 – 6.

## Примеры решения задач

Пример 1.

Определить абсолютную массовую скорость выгорания материала при площади пожара 10 и 20 м<sup>2</sup>, если табличное значение удельная массовой скорости выгорания равно 0,014 кг/(м<sup>2</sup>·с).

Решение.

Удельная массовая скорость выгорания  $\nu_{\text{м}}^{\text{уд}}$ , как следует из определения, это абсолютная массовая скорость выгорания, приведенная к единице площади пожара  $S_{\text{п}}$ . Таким образом:

$$\nu_{\text{м}}^{\text{абс}} = \nu_{\text{м}}^{\text{уд}} S_{\text{п}}.$$

$$\text{При } S_{\text{п}} = 10 \text{ м}^2 - \nu_{\text{м}}^{\text{абс}} = 0,014 \cdot 10 = 0,14 \text{ кг/с.}$$

$$\text{При } S_{\text{п}} = 20 \text{ м}^2 - \nu_{\text{м}}^{\text{абс}} = 0,014 \cdot 20 = 0,28 \text{ кг/с.}$$

Пример 2.

Определить теплоту пожара при горении материала, имеющего низшую теплоту сгорания 14000 кДж/кг, если табличное значение удельной массовой скорости выгорания равно 0,02 кг/(м<sup>2</sup>·с), площадь пожара 10 м<sup>2</sup>, коэффициент полноты сгорания – 0,8.

Решение.

Теплота пожара рассчитывается по формуле (1.6). С учетом формулы (1.4) получим

$$q_{п} = \beta v_{м}^{уд} S_{п} Q_{н} = 0,8 \cdot 0,02 \cdot 10 \cdot 14000 = 2240 \text{ кВт.}$$

Пример 3.

Рассчитать приведенную массовую скорость выгорания штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за 15 мин пожара его масса уменьшилась на 15 %. Штабель состоит из пяти рядов, в каждом ряду размещаются десять брусьев. Размеры бруса – 0,1×0,1×2 м. Плотность древесины  $\rho$  составляет 450 кг/м<sup>3</sup>. Определить коэффициент поверхности данного штабеля.

Решение.

Приведенная массовая скорость выгорания рассчитывается по формуле (1.5).

Изменение массы штабеля за время горения определим по формуле

$$\Delta m = \eta \rho V k n,$$

где  $\eta$  – доля выгоревшей массы штабеля;  $V$  – объём одного бруса, м<sup>3</sup>;  $k$  – количество брусьев в одном ряду;  $n$  – количество рядов в штабеле.

Подставив численные значения, получим

$$\Delta m = 0,15 \cdot 450 \cdot 0,1^2 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 5 = 67,5 \text{ кг.}$$

В конструкции штабеля имеются скрытые и открытые поверхности (рис. 1.1).

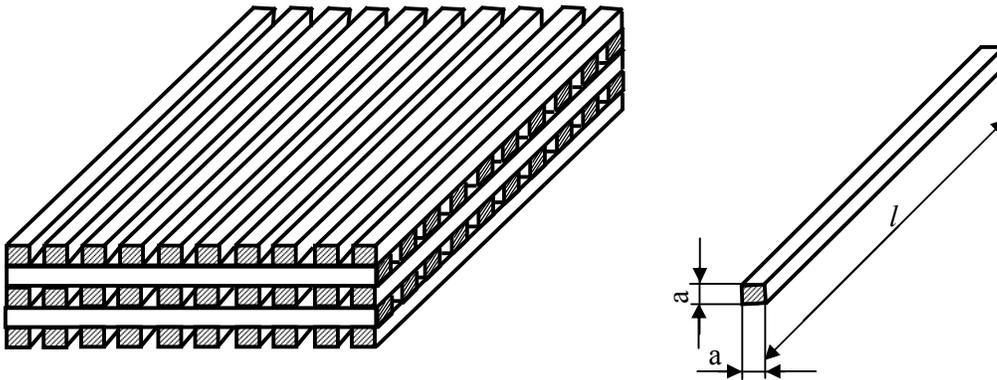


Рис. 1.1. Схема укладки штабеля

Скрытая поверхность штабеля состоит из граней брусьев, находящихся в нижнем ряду и соприкасающихся с поверхностью земли, а также участков брусьев, соприкасающихся друг с другом. Суммарную площадь скрытой поверхности  $S_{скр}$  находим по формуле

$$S_{\text{скр}} = alk + 2a^2k^2(n - 1),$$

где  $k$  – количество брусьев в одном ряду;  $n$  – количество рядов в штабеле.

Открытая поверхность (поверхность горения  $S_{\text{откр}}$ ) рассчитывается как разность общей поверхности всех брусьев  $S_{\text{общ}}$  и скрытой поверхности брусьев в штабеле:

$$S_{\text{откр}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{скр}},$$

где общая поверхность штабеля – это сумма площадей всех граней одного бруса, умноженная на количество всех брусьев в штабеле  $kn$ :

$$S_{\text{общ}} = (2a^2 + 4al)kn = (2 \cdot 0,1^2 + 4 \cdot 0,1 \cdot 2)10 \cdot 5 = 41 \text{ м}^2.$$

Площадь скрытой поверхности штабеля

$$S_{\text{скр}} = 0,1 \cdot 2 \cdot 10 + 2 \cdot 0,1^2 \cdot 10^2 (5 - 1) = 10 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности горения штабеля  $S_{\text{откр}}$  равна

$$S_{\text{откр}} = 41 - 10 = 31 \text{ м}^2.$$

Приведенная массовая скорость выгорания

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 67,5 / (31 \cdot 15 \cdot 60) = 0,0024 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Площадь пожара  $S_{\text{п}}$  составляет:

$$S_{\text{п}} = l^2 = 2^2 = 4 \text{ м}^2.$$

Коэффициент поверхности горения штабеля определяем по формуле (1.3):

$$K_{\text{п}} = 31/4 = 7,75.$$

Пример 4.

На сколько опустится уровень мазута за 28 мин горения в резервуаре. Плотность мазута составляет  $940 \text{ кг}/\text{м}^3$ , удельная массовая скорость выгорания равна  $0,035 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Решение.

Обозначим изменение уровня жидкости –  $\Delta h$ , время горения –  $\tau$ , удельную массовую скорость выгорания –  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ , плотность жидкости –  $\rho$ .

Объем выгоревшей жидкости  $V$  равен произведению площади зеркала жидкости  $S$  на  $\Delta h$  (рис. 1.2). Значение  $V$  также можно выразить через массу выгоревшего вещества  $m$  и плотность  $\rho$ :

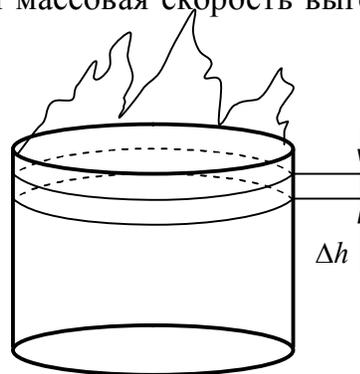


Рис. 1.2. Изменение уровня жидкости в резервуаре

$$V = m/\rho.$$

Тогда

$$\Delta h = \frac{m}{\rho S}.$$

В свою очередь,

$$m = v_M^{уд} \tau S.$$

Откуда находим:

$$\Delta h = \frac{v_M^{уд} \tau S}{\rho S} = \frac{0,035 \cdot 28 \cdot 60}{940} = 0,0630 \text{ м} = 6,3 \text{ см}.$$

Пример 5.

Определить величину удельной горючей и удельной пожарной нагрузки в помещении площадью  $12 \text{ м}^2$ . Пол в помещении выложен деревянным паркетом толщиной  $h = 2 \text{ см}$ . Плотность древесины  $\rho$ , из которой изготовлен паркет, составляет  $450 \text{ кг/м}^3$ . В помещении имеется следующая мебель: деревянные шкаф массой  $80 \text{ кг}$ ; стол –  $30 \text{ кг}$ ; два стула по  $7 \text{ кг}$  каждый; диван массой  $95 \text{ кг}$ , состоящий из  $70 \%$  древесины,  $20 \%$  пенополиуретана и  $10 \%$  кожи. Низшая теплота сгорания древесины составляет  $16,5 \text{ МДж/кг}$ , пенополиуретана –  $24,52$ , кожи –  $21,52 \text{ МДж/кг}$ .

Решение.

Расчет проводится по формулам (1.1) и (1.2):

$$p_{гн} = \frac{\sum m_i}{S_{пол}} \quad \text{и} \quad g_{пн} = \frac{\sum m_i Q_{ни}}{S_{пол}}.$$

Масса всех горючих материалов складывается из массы паркета, шкафа, стульев и массы горючих материалов, из которых собрана мебель.

Массу паркета  $m_{пар}$  определяем по формуле

$$m_{пар} = \rho V,$$

где  $V$  – объём паркета

$$V = S_{п} h = 12 \cdot 0,02 = 0,24 \text{ м}^3,$$

следовательно,

$$m_{пар} = 0,24 \cdot 450 = 108 \text{ кг}.$$

Массы древесины, пенополиуретана (ППУ) и кожи, из которых сделан диван, соответственно равны:

$$m_{древ} = 0,7 \cdot 95 = 66,5 \text{ кг};$$

$$m_{\text{шп}} = 0,20 \cdot 95 = 19 \text{ кг};$$

$$m_{\text{кожи}} = 0,10 \cdot 95 = 9,5 \text{ кг}.$$

Удельная горючая нагрузка  $p_{\text{гн}}$  равна

$$p_{\text{гн}} = \frac{108 + 80 + 30 + 2 \cdot 7 + 66,5 + 19 + 9,5}{12} = 27,25 \text{ кг/м}^2.$$

Удельная пожарная нагрузка

$$g_{\text{пн}} = \frac{(108 + 80 + 30 + 2 \cdot 7 + 66,5)16,5 + 19 \cdot 24,52 + 9,5 \cdot 21,52}{12} = 466,26 \text{ МДж/м}^2.$$

Пример 6.

Определить уровень нижней границы гомотермического слоя  $h$  при горении нефти в резервуаре. Начальный уровень жидкости  $H = 10$  м, время горения  $\tau = 40$  мин. Плотность данной нефти  $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$ , удельная массовая скорость выгорания  $v_{\text{м}}^{\text{уд}} = 0,045 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , скорость нарастания гомотермического слоя  $v_{\text{гтс}} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ .

Решение.

Глубина, на которую опустится нижняя граница гомотермического слоя за время горения, складывается из толщины выгоревшего слоя нефти  $\Delta H$ , м, и толщины самого слоя  $\delta_{\text{гтс}}$ , м (рис. 1.3).

Тогда

$$h = H - (\Delta H + \delta_{\text{гтс}});$$

$$\Delta H = \tau u_{\text{л}};$$

$$\delta_{\text{гтс}} = \tau v_{\text{гтс}}.$$

Линейная скорость выгорания  $u_{\text{л}}$  равна

$$u_{\text{л}} = v_{\text{м}}^{\text{уд}} / \rho = 0,045 / 750 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

Получаем

$$h = H - \tau(v_{\text{л}} + v_{\text{гтс}}) =$$

$$= 10 - 40 \cdot 60 (6 \cdot 10^{-5} + 7 \cdot 10^{-4}) = 10 - 2 = 8,176 \text{ м}.$$

Пример 7.

Рассчитать параметры пожара компактного газового фонтана: дебит  $D$ , теплоту пожара  $q_{\text{п}}$ , коэффициент излучения пламени в окружающую среду  $f$ . Определить расстояние  $L$  (см. рис. 1.3), на котором плотность теплового потока равна 4 и 14 кВт/м<sup>2</sup>. Состав газа: 85 % метана, 9 % этана,

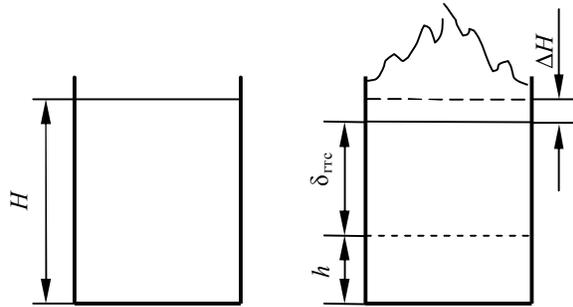


Рис. 1.3. Иллюстрация к примеру 6

3 % пропана, 2 % азота и 1 % бутана. Высота факела  $H_{\phi} - 35$  м, высота скважины 1 м, внутренний диаметр трубы 102 мм. Низшая теплота сгорания метана 802 кДж/моль, этана – 1576 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль, бутана – 2657 кДж/моль.

Решение.

Дебит фонтана рассчитывается по формуле (1.7):

$$D \approx 0,0025H_{\phi} \approx 0,0025 \cdot 35^2 = 3 \text{ млн м}^3/\text{сут.}$$

Теплота пожара  $q_{\text{п}}$ , кВт, определяется по формуле (1.6):

$$q_{\text{п}} = v_{\text{м}}^{\text{abc}} Q_{\text{н}} \beta.$$

Для газовых фонтанов коэффициент  $\beta \approx 1$ , скорость сгорания равна секунднему расходу газа  $v_{\text{г}}$ . Соответственно значение  $Q_{\text{н}}$  следует подставлять в кДж/м<sup>3</sup>, т. е.

$$q_{\text{п}} = v_{\text{г}} Q_{\text{н}}^{\text{cm}}.$$

Низшая теплота сгорания смеси газов определяется по формуле

$$Q_{\text{н}}^{\text{cm}} = \sum Q_{\text{ни}} a_i,$$

где  $Q_{\text{ни}}$  – низшая теплота сгорания  $i$ -го горючего компонента;  $a_i$  – доля  $i$ -го компонента в смеси.

Подставив значения  $Q_{\text{ни}}$  каждого горючего компонента в формулу, получим

$$Q_{\text{н}}^{\text{cm}} = 0,85 \cdot 802 + 0,09 \cdot 1576 + 0,03 \cdot 2044 + 0,01 \cdot 2657 = 911,4 \text{ кДж/моль} = \\ = 40687,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Секундный расход газа:

$$v_{\text{г}} = 3 \cdot 10^6 / (24 \cdot 60 \cdot 60) = 34,7 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Теплота пожара данного фонтана

$$q_{\text{п}} = 34,7 \cdot 40687,5 = 1411856,2 \text{ кВт} = 1411,90 \text{ МВт.}$$

Коэффициент излучения представляет собой долю теплоты сгорания, теряемую в виде лучистой энергии в окружающую среду. Для углеводородных горючих он находится по формуле (1.8):

$$f = 0,05\sqrt{M}.$$

Средняя молярная масса горючих компонентов смеси равна (см. формулу (1.9))

$$M = \sum M_i a_i = 0,85 \cdot 16 + 0,09 \cdot 30 + 0,03 \cdot 44 + 0,01 \cdot 58 = 18,2 \text{ кг/кмоль.}$$

Коэффициент излучения равен

$$f = 0,05 \sqrt{18,2} = 0,21.$$

При расчете расстояния  $L$  принимается, что источником излучения пламени фонтана является точка, расположенная в его геометрическом центре, – т.е. на высоте  $H_{\phi}/2$  от устья скважины (рис. 1.4).

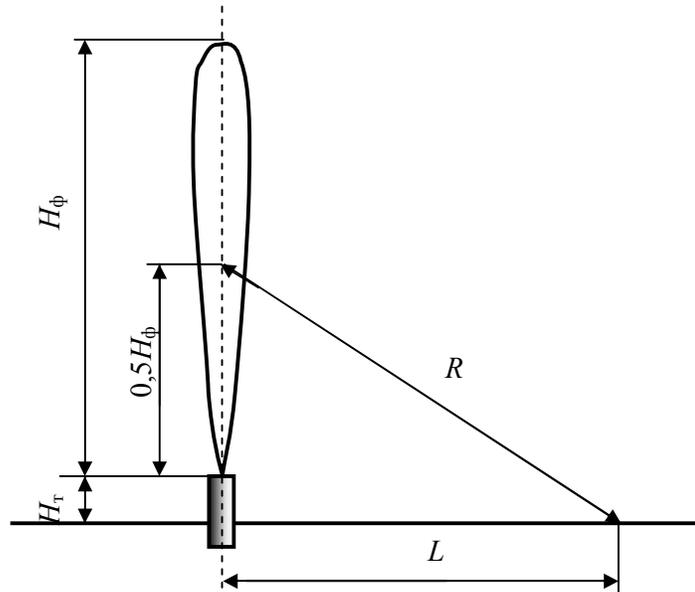


Рис. 1.4. Схема для расчета плотности теплового потока

Тогда плотность потока излучения  $W$  через сферу радиусом  $R$ , исходя из формулы (1.11), равна

$$W = \frac{q_{\text{л}}}{4\pi R^2} = \frac{f Q_{\text{H}} v_{\text{Г}}}{4\pi R^2},$$

откуда расстояние  $R$ , на котором плотность лучистого теплового потока равна заданному значению  $q_{\text{зад}}$ , определяется выражением

$$R = \sqrt{\frac{f Q_{\text{H}} v_{\text{Г}}}{4\pi q_{\text{зад}}}}.$$

Расстояние  $R_1$  для  $q_{\text{зад}} = 4 \text{ кВт/м}^2$ :

$$R_1 = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 1411856,2}{4 \cdot 3,14 \cdot 4}} = 76,8 \text{ м.}$$

Расстояние  $R_2$  для  $q_{\text{зад}} = 14 \text{ кВт/м}^2$ :

$$R_2 = \sqrt{\frac{0,21 \cdot 1411856,2}{4 \cdot 3,14 \cdot 14}} = 41 \text{ м.}$$

Очевидно, что соответствующее расстояние от скважины на уровне земли  $L$  (см. рис. 1.4) равно

$$L = \sqrt{R^2 - (0,5H_{\phi} + H_{\tau})^2}.$$

Расстояние  $L_1$  для  $q_{\text{зад}} = 4 \text{ кВт/м}^2$ :

$$L_1 = \sqrt{76,8^2 - (0,5 \cdot 35 + 1)^2} = 74,5 \text{ м.}$$

Расстояние  $L_2$  для  $q_{\text{зад}} = 14 \text{ кВт/м}^2$ :

$$L_2 = \sqrt{41^2 - (0,5 \cdot 35 + 1)^2} = 36,5 \text{ м.}$$

## Контрольные задачи

1. Найти массу сгоревшей древесины при пожаре штабеля, сложенного из брёвен в 5 рядов.

В каждом ряду семь бревен (рис. 1.5). Плотность древесины составляет  $500 \text{ кг/м}^3$ , приведенная массовая скорость выгорания –  $0,012 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Пожар длился 8 мин, средний диаметр брёвен – 15 см, длина каждого бревна составляет – 1,5 м.

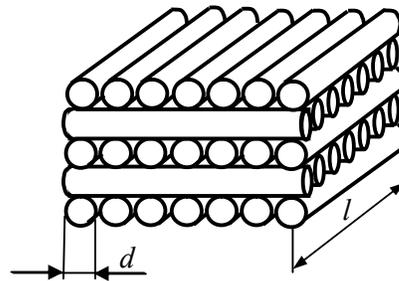


Рис. 1.5. Схема укладки штабеля

2. За какое время горения уровень жидкости в резервуаре опустится на 3,4 см, если удельная массовая скорость выгорания горючей жидкости равна  $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , плотность жидкости  $850 \text{ кг/м}^3$ .

3. Найти линейную скорость выгорания керосина в резервуаре, если плотность керосина  $780 \text{ кг/м}^3$ , удельная массовая скорость выгорания составляет  $0,048 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

4. Определить величину удельной горючей и удельной пожарной нагрузки в помещении склада площадью  $20 \text{ м}^2$ . Пол в помещении выложен деревянными досками толщиной  $4 \text{ см}$ . Поверх половых досок настелен линолеум толщиной  $3 \text{ мм}$ . Плотность линолеума –  $2000 \text{ кг/м}^3$ . На деревянных стеллажах (суммарная масса стеллажей –  $180 \text{ кг}$ ) хранятся изделия из следующих материалов: кожи –  $120 \text{ кг}$ , ткани –  $80 \text{ кг}$ , бумаги –  $50 \text{ кг}$ , резины –  $160 \text{ кг}$ . Плотность древесины составляет  $450 \text{ кг/м}^3$ . Низшая теплота сгорания древесины –  $16,5 \text{ МДж/кг}$ ; линолеума  $33,52$ ; кожи –  $24,52$ ; ткани –  $13,4$ ; бумаги –  $14,5$  и резины –  $33,52 \text{ МДж/кг}$ .

5. Определить количество тепла, которое выделится на внутреннем пожаре за  $20 \text{ мин}$ , если площадь поверхности горения составляет  $250 \text{ м}^2$ , средний коэффициент поверхности равен  $5$ , приведённая массовая скорость выгорания –  $0,008 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , низшая теплота сгорания горючего составляет  $25 \text{ МДж/кг}$ , коэффициент полноты сгорания –  $0,8$ .

6. В помещении площадью  $50 \text{ м}^2$  сложен горючий материал в форме куба. Ребро куба  $a = 4 \text{ м}$ , плотность материала  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ , низшая теплота сгорания  $Q_n = 20000 \text{ кДж/кг}$ , коэффициент полноты сгорания  $\beta = 0,7$ . Рассчитать удельную пожарную нагрузку помещения и коэффициент поверхности. Определить параметры пожара: массовую скорость выгорания абсолютную, удельную и приведённую; теплоту пожара, если за  $120 \text{ мин}$  горения масса материала уменьшилась на  $10 \%$ .

7. Определить время возникновения горения в торговом зале книжного магазина по следующим исходным данным. Пожар ликвидирован в  $10 \text{ ч } 00 \text{ мин}$ . Площадь пожара равна площади помещения –  $200 \text{ м}^2$ . Масса горючего до пожара  $35000 \text{ кг}$ . Средняя степень выгорания  $30 \%$ . Среднее значение удельной массовой скорости выгорания за время горения и тушения принять равным половине табличного значения, которое равно  $0,012 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

8. Рассчитать параметры пожара компактного газового фонтана: дебит  $D$ , теплоту пожара  $q_p$ , коэффициент излучения пламени в окружающую среду  $f$ . Определить расстояние  $L$ , на котором плотность теплового потока равна  $10$  и  $20 \text{ кВт/м}^2$ . Состав газа:  $80 \%$  метана,  $12 \%$  сероводорода,  $3 \%$  пропана,  $2 \%$  азота и  $3 \%$  сероуглерода. Высота факела  $H_f = 50 \text{ м}$ , высота скважины –  $1 \text{ м}$ , внутренний диаметр трубы –  $95 \text{ мм}$ .

## Задание для самостоятельной работы 1

Рассчитать один из параметров открытого пожара штабеля древесины.

Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы. Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в табл. 1.1 и 1.2. Требуется определить параметр, для которого в табл. 1.2 указано «найти».

Таблица 1.1

**Параметры штабеля**

№ п/п	Вид штабеля*	Плотность древесины $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Длина бруса $l$ , м	Диаметр $d$ , м	Сечение $a$ , м
1	1	420	1,5	0,4	–
2	2	450	1,4	–	0,3
3	3	470	1,2	0,3	–
4	4	500	1,0	–	0,2
5	7	510	0,8	0,2	–
6	2	420	1,5	–	0,25
7	1	450	1,4	0,3	–
8	6	470	1,2	–	0,3
9	5	500	1,0	0,2	–
10	8	510	0,8	–	0,2
11	1	430	1,6	0,5	–
12	2	490	1,7	–	0,2
13	7	500	0,9	0,25	–
14	3	460	1,1	0,15	–
15	6	440	1,5	–	0,25
16	8	480	1,0	–	0,2
17	5	510	0,8	0,2	–
18	4	460	0,9	–	0,9
19	1	450	1,5	0,15	–
20	7	520	0,8	0,25	–
21	1	450	1,5	0,1	–
22	2	420	1,4	–	0,15
23	3	480	1,2	0,15	–
24	4	500	1,5	–	0,2
25	7	410	0,9	0,2	–
26	2	400	1,8	–	0,15
27	1	440	1,5	0,1	–
28	6	450	1,4	–	0,1
29	5	500	1,5	0,15	–
30	8	510	0,9	–	0,2

\* Вид и параметры штабеля приведены на рис. 1.6.

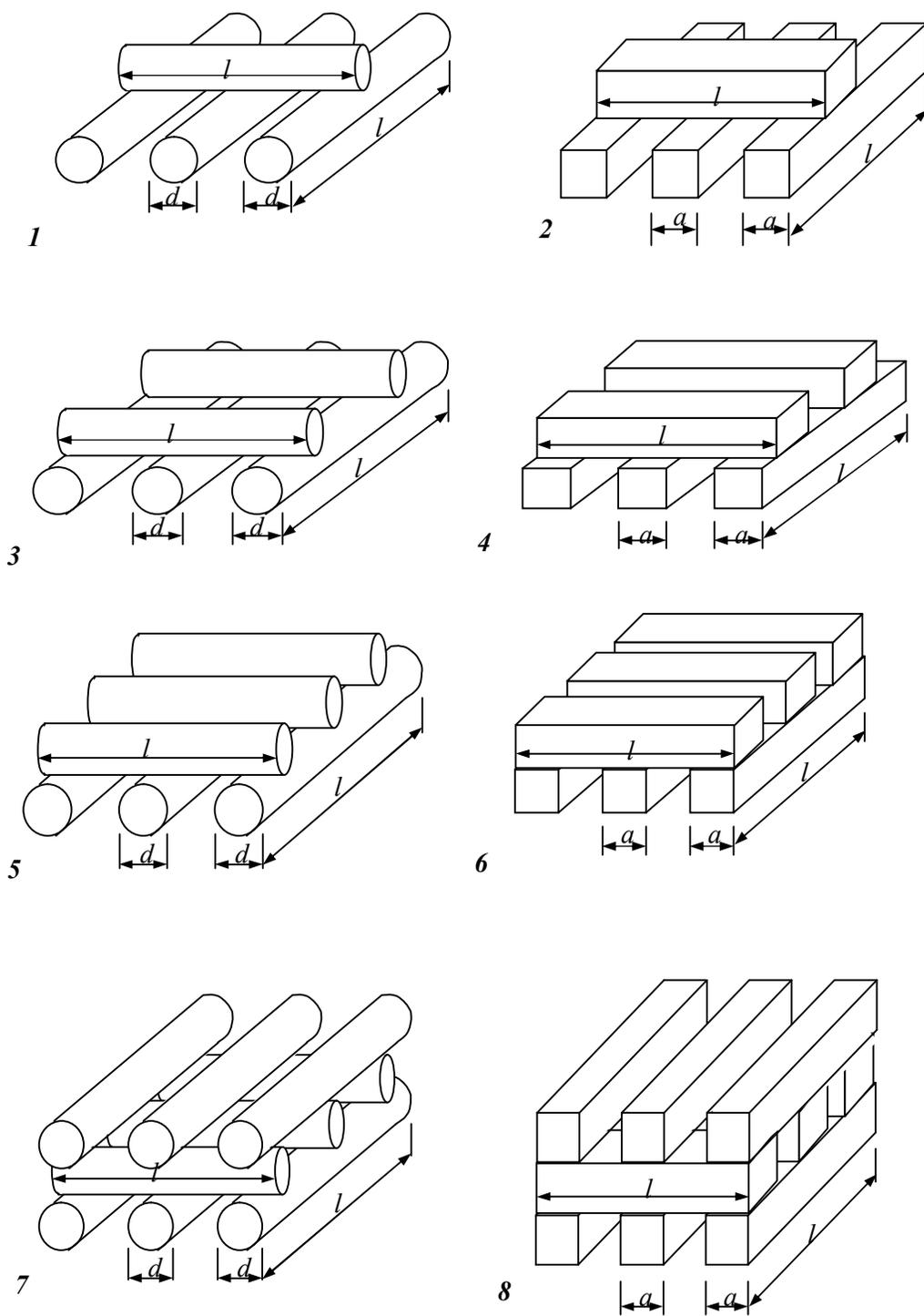


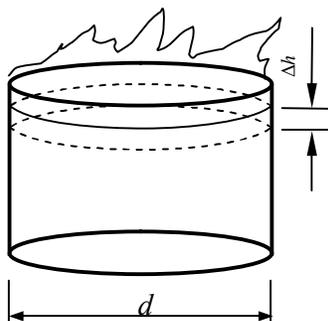
Рис. 1.6. Параметры штабеля к табл. 1.1

Таблица 1.2

### Параметры пожара

№ п/п	Выгоревшая масса $\Delta m$ , кг	Время горения $\tau$ , мин	Приведенная массовая скорость выгорания $v_M^{пр}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Удельная массовая скорость выгорания $v_M^{уд}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
1	найти	6	–	0,012
2	35	найти	–	0,014
3	30	8	–	найти
4	–	–	0,007	найти
5	найти	12	–	0,010
6	25	найти	–	0,018
7	15	10	–	найти
8	–	–	0,008	найти
9	найти	5	–	0,015
10	20	найти	–	0,014
11	найти	10	–	0,013
12	25	найти	–	0,015
13	35	7	–	найти
14	–	–	0,0075	найти
15	найти	13	–	0,011
16	27	найти	–	0,017
17	18	9	–	найти
18	–	–	0,009	найти
19	найти	7	–	0,013
20	19	найти	–	0,016
21	найти	9	–	0,012
22	25	найти	–	0,017
23	40	12	–	найти
24	–	–	0,008	найти
25	найти	15	–	0,012
26	30	найти	–	0,019
27	20	8	–	найти
28	–	–	0,009	найти
29	найти	10	–	0,016
30	26	найти	–	0,015

## Задание для самостоятельной работы 2



Определить теплоту пожара при горении жидкости в резервуаре и один из параметров, указанных в табл. 1.3.

Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы. Исходные данные приведены в табл. 1.3, 1.4.

Таблица 1.3

### Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Глубина выгорания $\Delta h$ , см	Время выгорания $\tau$ , мин	Удельная массовая скорость выгорания $V_M^{пр}$ , $кг/(м^2 \cdot с)$	Линейная скорость выгорания $u_{л}$ , мм/с
1	найти	25	0,047	–
2	3,0	найти	0,035	–
3	–	–	0,038	найти
4	–	–	найти	0,083
5	найти	20	0,013	–
6	2,5	найти	0,020	–
7	–	–	0,045	найти
8	–	–	найти	0,055
9	найти	30	0,017	–
10	4,0	найти	0,025	–
11	найти	15	0,022	–
12	2,0	найти	0,033	–
13	–	–	0,040	найти
14	–	–	найти	0,065
15	найти	10	0,015	–
16	3,5	найти	0,030	–
17	–	–	0,045	найти
18	–	–	найти	0,074
19	найти	20	0,039	–
20	3,0	найти	0,028	–
21	найти	15	0,037	–
22	2,5	найти	0,042	–
23	–	–	0,017	найти
24	–	–	найти	0,070
25	найти	10	0,035	–
26	4,0	найти	0,027	–
27	–	–	0,020	найти
28	–	–	найти	0,053
29	найти	30	0,023	–
30	3,5	найти	0,055	–

Таблица 1.4

## Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Диаметр резервуара $d$ , м	Низшая теплота сгорания $Q_{н}$ , кДж/кг	Коэффициент полноты сгорания $\beta$
1	Ацетон	790	10	31360	0,93
2	Мазут	940	8	41900	0,85
3	Керосин осветительный	790	12	43692	0,8
4	Бензин	800	5	43580	0,85
5	Бутиловый спирт	805	4	36200	0,93
6	Нефть	920	10	43600	0,85
7	Гептан	684	8	44919	0,90
8	Декан	734	12	44602	0,80
9	Изобутиловый спирт	803	5	36743	0,85
10	Изопропиловый спирт	784	4	34139	0,90
11	Метиловый спирт	787	8	23839	0,90
12	Октан	702	10	44787	0,80
13	Пентан	621	15	45350	0,85
14	Пропиловый спирт	801	8	34405	0,85
15	Этиловый спирт	785	6	30562	0,90
16	Дизельное топливо	790	15	43419	0,80
17	Уайт-спирит	780	10	43966	0,90
18	Масло трансформаторное	870	8	43550	0,87
19	Гексан	655	6	45105	0,83
20	Гексиловый спирт	826	5	39587	0,85
21	Изопентан	619	8	45239	0,90
22	Акриловая кислота	1051	7	18000	0,80
23	Амиловый спирт	805	12	34702	0,85
24	Бензол	874	8	38519	0,85
25	Гексадекан	773	10	44312	0,9
26	Этилбензол	863	5	41323	0,87
27	Анилин	1022	6	32384	0,86
28	Ксилол	860	4	52829	0,9
29	Нефть	900	12	42800	0,85
30	Керосин тракторный	820	12	43700	0,85

## Глава 2

### ГАЗООБМЕН НА ВНУТРЕННЕМ ПОЖАРЕ. РЕЖИМЫ ПОЖАРОВ

Причиной газообмена при пожаре в помещении является разность давлений газовой среды внутри помещения и воздуха снаружи. При развившемся пожаре распределение давлений по высоте внутри и снаружи помещения, как правило, складывается так, что в верхней части давление газов больше, а в нижней части меньше атмосферного (рис. 2.1).

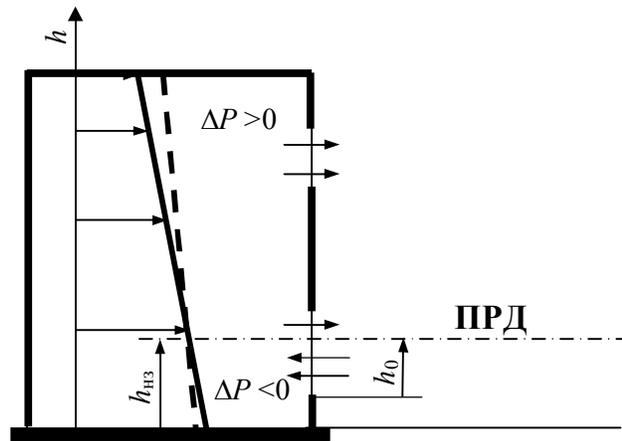


Рис. 2.1. Распределение давлений при развившемся пожаре в помещении:

сплошная линия – эпюра давлений воздуха снаружи; пунктирная – эпюра давлений газовой среды внутри помещения

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

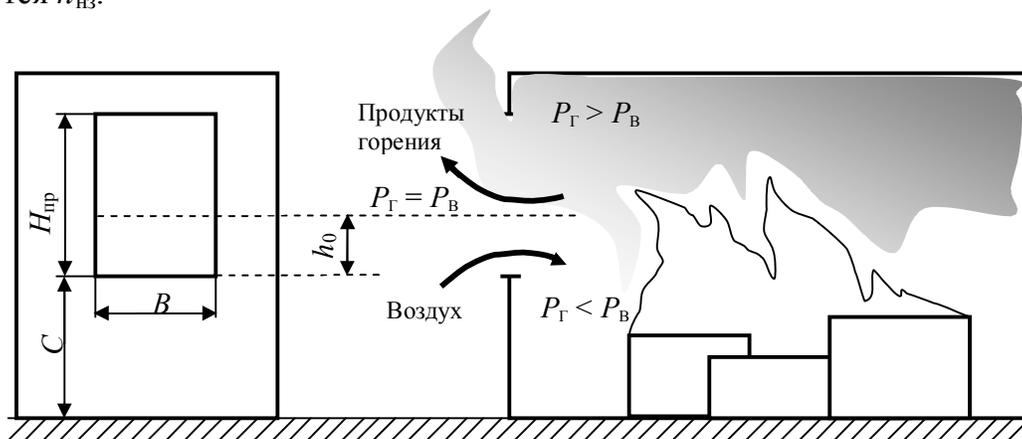


Рис. 2.2. Схема газообмена при пожаре в помещении

Через все отверстия, расположенные выше ПРД, из помещения удаляются газы, ниже ПРД – поступает воздух (рис. 2.2). При этом расход воздуха через проемы определяется высотой ПРД относительно нижней отметки проема –  $h_0$ .

Основными параметрами газообмена являются:

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

$$G_B^0 = v_M^{уд} S_{\Pi} V_B^0 \rho_B, \quad (2.1)$$

где  $v_M^{уд}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $S_{\Pi}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>;  $V_B^0$  – теоретический объём воздуха, необходимый для горения, м<sup>3</sup>/кг;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

*фактический расход воздуха*  $G_B^{\Phi}$ , кг/с, – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени. При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одном уровне:

$$G_B^{\Phi} = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_B (\rho_B - \rho_{\text{пр}})}, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проёма ( $\mu = 0,6 - 0,7$ );  $B$  – ширина проёма, м;  $h_0$  – высота ПРД относительно нижней отметки проема, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{пр}}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>.

*коэффициент избытка воздуха* на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха к требуемому:

$$\alpha = \frac{G_B^{\Phi}}{G_B^0}. \quad (2.3)$$

Коэффициент избытка воздуха определяет среднеобъемную концентрацию кислорода в продуктах горения  $\varphi_{O_2}$  в данный момент времени. Во время свободного развития пожара коэффициент избытка воздуха изменяется. Вначале, пока массовая скорость выгорания мала и  $G_B^0$  невелик, проемы практически не лимитируют приток воздуха в помещение. Коэффициент  $\alpha$  в этом случае может составлять 40 и более. По мере увеличения массовой скорости выгорания возрастает  $G_B^0$ , а пропускная способность проемов уменьшается вследствие снижения  $h_0$ . Коэффициент избытка воздуха уменьшается до некоторого минимального значения, затем остается постоянным и при снижении  $v_M$ , вследствие выгорания материала, возрастает.

Соответственно изменяется и среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения. Каждое горючее вещество имеет свое значение предельной концентрации кислорода  $\varphi_{O_2}^{пр}$ , ниже которого гомогенное горение прекращается. Если в ходе уменьшения  $\alpha$  концентрация кислорода в продуктах горения понизится до значения, предельного для данного горючего, пламенное горение прекратится. Если среднеобъемная температура при этом была ниже температуры воспламенения горючих веществ, находящихся в помещении (для твердых материалов  $\approx 300$  °С), возможно самозатухание пожара. Если среднеобъемная температура была выше температуры воспламенения, постепенное прекращение пламенного горения вызовет уменьшение массовой скорости выгорания и, соответственно, требуемого расхода воздуха. В результате этого наступит момент, когда  $\alpha$  и концентрация кислорода начнут возрастать. Когда концентрация кислорода в продуктах горения станет больше предельной, пламенное горение возобновится. В случае такого развития пожара, при вскрытии дополнительных проемов, существует опасность объемной вспышки.

Если  $\varphi_{O_2} > \varphi_{O_2}^{пр}$ , пожар будет продолжаться до полного прекращения горения в результате тушения или выгорания горючего.

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода соотношением:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}. \quad (2.4)$$

При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одинаковом расстоянии от пола, величину  $h_0$  рассчитывают по формуле

$$h_0 = \frac{H_{пр}}{1 + 3\sqrt{\frac{\rho_{в}}{\rho_{пр}}}} = \frac{H_{пр}}{1 + 3\sqrt{\frac{T_{п}}{T_{в}}}}, \quad (2.5)$$

где  $H_{пр}$  – высота проема, м;  $T_{п}$ ,  $T_{в}$  – температура пожара и наружного воздуха соответственно, К.

График зависимости плотности продуктов горения от температуры приведен в прил. 1. Плотность воздуха  $\rho_{в}$ , кг/м<sup>3</sup>, и продуктов горения  $\rho_{пр}$ , кг/м<sup>3</sup>, можно рассчитать по следующим формулам:

$$\rho_{в} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T_{ос}}; \quad (2.6)$$

$$\rho_{\text{пр}} = 12 \cdot 10^{-5} \frac{P}{T_{\text{ос}}} \frac{\sum (M_{\text{пр}i} n_{\text{пр}i})}{\sum n_{\text{пр}i}}, \quad (2.7)$$

где  $P$  и  $T_{\text{ос}}$  – давление и температура окружающей среды, Па, К;  $M_{\text{пр}i}$  – молярная масса  $i$ -го продукта горения;  $n_{\text{пр}i}$  – коэффициенты в уравнении реакции горения перед  $i$ -ми продуктами горения.

При горении комбинированной горючей нагрузки, когда состав продуктов горения определить невозможно, оценить их плотность при заданной температуре можно по формуле, вытекающей из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$\rho_{\text{пр}} = \rho_{\text{в}} \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{п}}}, \quad (2.8)$$

где  $T_{\text{в}}$  и  $T_{\text{п}}$  – температура воздуха и пожара соответственно, К.

При расчетах принимается  $T_{\text{в}} = 293$  К, соответственно  $\rho_{\text{в}} = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Тогда

$$\rho_{\text{пр}} \approx \frac{352}{T_{\text{п}}}. \quad (2.9)$$

Если газообмен осуществляется через несколько проёмов, расположенных на разных уровнях, вместо  $h_0$  в расчетные формулы подставляют средневзвешенную величину  $h_1$  (рис. 2.3).

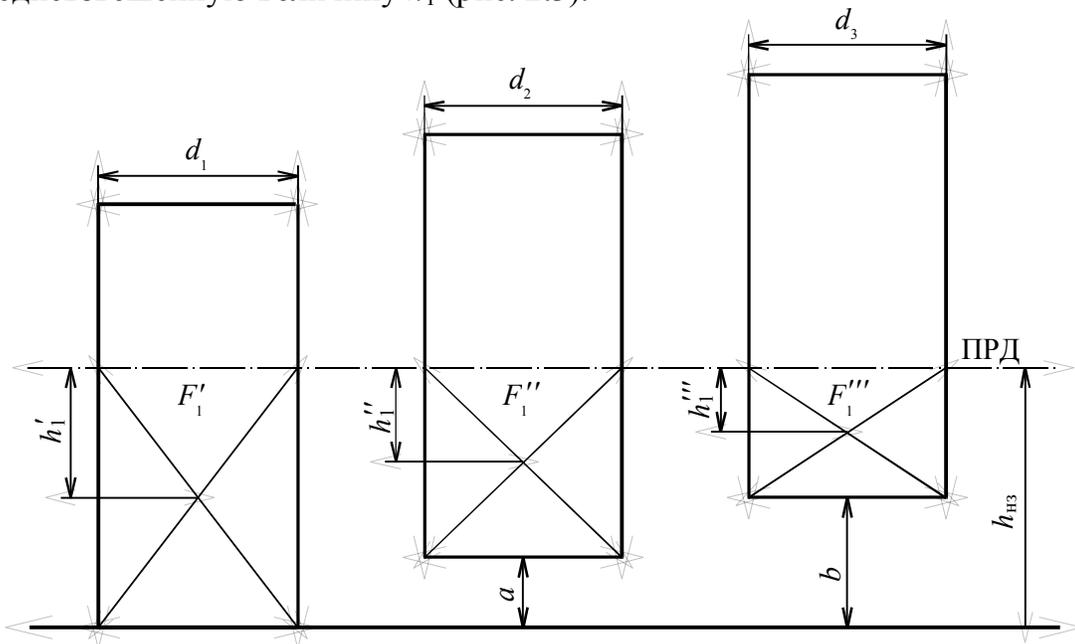


Рис. 2.3. Схема газообмена через несколько проёмов, расположенных на разных уровнях

Обозначим  $F_{\text{пр}1}$ ,  $F_{\text{пр}2}$ ,  $F_{\text{пр}3}$  общую площадь каждого проема, а  $F'_1$ ,  $F''_1$ ,  $F'''_1$  – площади частей проемов, работающих на приток воздуха. Тогда общая площадь проемов, участвующих в газообмене, равна

$$\sum F_{\text{пр}} = F_{\text{пр}1} + F_{\text{пр}2} + F_{\text{пр}3}. \quad (2.10)$$

При установившемся процессе газообмена общая площадь проемов, работающая на приток воздуха, приближенно равна

$$\sum F_1 = 1/3 \sum F_{\text{пр}} \quad (2.11)$$

или

$$\sum F_1 = h_{\text{нз}} d_1 + (h_{\text{нз}} - a) d_2 + (h_{\text{нз}} - b) d_3, \quad (2.12)$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  – ширина соответствующего проема, м;  $a$ ,  $b$  – нижние отметки проемов (см. рис. 2.3).

Из этого уравнения находим  $h_{\text{нз}}$ , а затем ( см. рис. 2.3)  $h'_1$ ,  $h''_1$  и  $h'''_1$ :

$$h'_1 = h_{\text{нз}}/2; \quad h''_1 = (h_{\text{нз}} - a)/2; \quad h'''_1 = (h_{\text{нз}} - b)/2,$$

где  $h'_1$ ,  $h''_1$  и  $h'''_1$  – расстояния от центров приточных частей проемов до плоскости равных давлений, м.

Значение  $h_1$  берется как средневзвешенная величина

$$h_1 = \frac{h'_1 F'_1 + h''_1 F''_1 + h'''_1 F'''_1}{F'_1 + F''_1 + F'''_1}, \quad (2.13)$$

где  $F'_0 = h_{\text{нз}} d_1$ ;  $F''_0 = (h_{\text{нз}} - a) d_2$ ;  $F'''_0 = (h_{\text{нз}} - b) d_3$ .

В зависимости от соотношения массовой скорости образования в помещении горючих газов в результате пиролиза или испарения горючего и скорости их сгорания в смеси с поступающим воздухом различают два режима внутреннего пожара. В тех случаях, когда приток воздуха достаточен для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего, массовая скорость сгорания горючих газов не зависит от расхода воздуха, поступающего в помещение. Такой режим получил название «пожар, регулируемый нагрузкой» (ПРН). В тех случаях, когда расход приточного воздуха не обеспечивает максимальную полноту сгорания, режим называется «пожар, регулируемый вентиляцией» (ПРВ).

Если при развитии пожара в режиме ПРН увеличить приток воздуха в помещение, то температура газовой среды понизится, так как наружный воздух является значительно более холодным. Вскрытие проемов, откачивание дыма при ПРН также приводит к снижению температуры пожара.

При длительном развитии пожара в режиме ПРВ в помещении накапливаются несгоревшие газы. Вскрытие проемов приводит к их разбавлению

воздухом, образованию и воспламенению горючей смеси – объемной вспышке.

При горении штабеля древесины режим пожара можно определить по параметру  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{\rho_{\text{в}} \sqrt{g} S_{\text{пр}} \sqrt{H}}{S_{\text{пр}}}, \quad (2.14)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>;  $S_{\text{пр}}$  – площадь проема, м<sup>2</sup>;  $H$  – высота проема, м;  $S_{\text{пр}}$  – площадь поверхности горения, м<sup>2</sup>.

Если  $\Phi \leq 0,235$  – пожар, регулируемый вентиляцией,  $\Phi \geq 0,29$  – пожар, регулируемый нагрузкой. При  $0,235 < \Phi < 0,29$  – комбинированный режим пожара, когда в помещении имеются одновременно участки, где приток воздуха обеспечивает режим ПРН (обычно вблизи проемов), и участки, на которых – режим ПРВ.

Табличные данные, необходимые для решения задач, приведены в приложениях 1 – 6.

### Примеры решения задач

#### Пример 1.

Рассчитать требуемый расход воздуха при горении в помещении ацетона в емкости диаметром 1,5 м, если удельная массовая скорость выгорания 0,1 кг/(м<sup>2</sup>·с). Температура окружающей среды 0 °С, давление нормальное.

#### Решение.

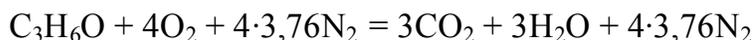
Расчетная формула для определения требуемого расхода воздуха приводится к виду

$$G_{\text{в}}^0 = v_{\text{м}}^{\text{уд}} S_{\text{п}} V_{\text{в}}^0 \rho_{\text{в}}.$$

Площадь резервуара составляет

$$S_{\text{п}} = \pi r^2 = 3,14(1,5/2)^2 = 1,766 \text{ м}^2.$$

Для расчёта теоретического объёма воздуха необходимо воспользоваться методикой, изложенной в учебном пособии [1].



$$V_{\text{в}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})V_0}{n_{\text{г}}M_{\text{г}}} = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76)22,4}{58} = 7,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Плотность воздуха для данных условий составит

$$\rho_{\text{в}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{101325}{273} = 1,29 \text{ кг/м}^3.$$

Требуемый расход воздуха равен

$$G_{\text{в}}^0 = 0,1 \cdot 7,35 \cdot 1,766 \cdot 1,29 = 1,67 \text{ кг/с.}$$

Пример 2.

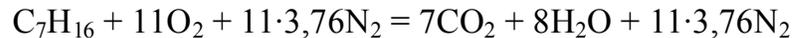
Рассчитать фактический расход воздуха через дверной проём размером  $1,5 \times 2,5$  м и определить положение плоскости равных давлений, если в помещении в резервуаре горит гептан. Среднеобъёмная температура внутри помещения составляет  $65^\circ \text{C}$ , температура окружающей среды –  $20^\circ \text{C}$ , давление – нормальное.

Решение.

Фактический расход воздуха при газообмене через один проем рассчитывается по формуле (2.2):

$$G_{\text{в}}^{\phi} = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_{\text{в}} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пр}})}.$$

Для нахождения плотности продуктов горения необходимо воспользоваться формулой (2.7), предварительно рассчитав мольную долю  $i$ -го продукта горения:



$$a_{\text{пр}i} = \frac{n_{\text{пр}i}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2}},$$

где  $a_{\text{пр}i}$  – мольная доля  $i$ -го продукта горения;  $n$  – стехиометрический коэффициент;

$$a_{\text{CO}_2} = \frac{7}{7 + 8 + 11 \cdot 3,76} = 0,12;$$

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{8}{7 + 8 + 11 \cdot 3,76} = 0,14;$$

$$a_{\text{N}_2} = \frac{11 \cdot 3,76}{7 + 8 + 11 \cdot 3,76} = 0,74.$$

Молярные массы диоксида углерода, воды и азота соответственно равны 44, 18 и 28 кг/кмоль.

С учётом найденных значений мольных долей, плотность смеси продуктов горения равна

$$\rho_{\text{пр}} = 12 \cdot 10^{-5} \frac{101325}{273 + 65} (0,12 \cdot 44 + 0,14 \cdot 18 + 0,74 \cdot 28) = 1,025 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность воздуха рассчитывается по формуле (2.6):

$$\rho_{\text{в}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{101325}{273 + 20} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Коэффициент сопротивления проема  $\mu$  примем равным 0,65.  
Высоту плоскости равных давлений находим по формуле (2.5)

$$h_0 = \frac{2,5}{1 + \sqrt[3]{\frac{1,2}{1,025}}} = 1,22 \text{ м.}$$

Подставляем найденные величины в формулу (2.2):

$$\begin{aligned} G_{\text{в}}^{\phi} &= \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_{\text{в}} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пр}})} = \\ &= \frac{2}{3} 0,65 \cdot 1,5 \cdot 1,22 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,22 \cdot 1,2 (1,2 - 1,025)} = 1,77 \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

**Пример 3.** Определить площадь пожара  $S_{\text{п}}$  в помещении, при которой среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 14 %. Фактический расход поступающего воздуха  $G_{\text{в}}^{\phi}$  составляет 1,6 кг/с, удельная массовая скорость выгорания  $\nu_{\text{м}}^{\text{уд}}$  равна 0,06 кг/(м<sup>2</sup>·с), теоретический объем воздуха  $V_{\text{в}}^0 = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , плотность воздуха  $\rho_{\text{в}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

**Решение.**

Концентрация кислорода в продуктах горения  $\varphi_{\text{O}_2}$  определяет значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при наличии газообмена помещения с окружающей средой:

$$\alpha = G_{\text{в}}^{\phi} / G_{\text{в}}^0.$$

Требуемый расход воздуха  $G_{\text{в}}^0$  рассчитывается по формуле (2.1):

$$G_{\text{в}}^0 = \nu_{\text{м}}^{\text{уд}} S_{\text{п}} V_{\text{в}}^0 \rho_{\text{в}}.$$

Откуда формула расчёта площади пожара приобретает вид:

$$S_{\text{п}} = \frac{G_{\text{в}}^{\phi}}{\alpha \nu_{\text{м}}^{\text{уд}} \rho_{\text{в}} V_{\text{в}}^0}.$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой

$$\alpha \approx \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}} = \frac{21}{21 - 14} = 3.$$

Тогда площадь пожара равна

$$S_{\text{п}} = 1,6 / (3 \cdot 0,06 \cdot 4,2 \cdot 1,2) = 1,78 \text{ м}^2.$$

### Контрольные задачи

1. Определить площадь пожара  $S_{\text{п}}$  в помещении, при которой в процессе его развития произойдёт переход в режим ПРВ, если газообмен осуществляется через один проём размером  $1,5 \times 1,5$  м, коэффициент поверхности горючей нагрузки  $K_{\text{п}} = 4$ .

2. Определить высоту проёма, при которой пожар в помещении, достигнув площади  $5 \text{ м}^2$ , перейдёт в режим ПРВ. Газообмен осуществляется через один проём шириной 1 м, коэффициент поверхности горючей нагрузки  $K_{\text{п}} = 3$ .

3. Оценить среднеобъёмную температуру газовой среды внутри помещения, если газообмен протекает через один дверной проём, высотой 2,2 м. Высота плоскости равных давлений 1,0 м, температура воздуха составляет  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Определить положение плоскости равных давлений относительно пола при пожаре в помещении, если температура наружного воздуха  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура пожара  $340 \text{ }^\circ\text{C}$ , высота оконного проёма равна 1,5 м, расстояние от пола до подоконника 0,9 м.

5. Определить среднеобъёмную концентрацию кислорода в продуктах горения, если фактический расход воздуха, поступающего в помещение, равен  $1,4 \text{ кг/с}$ , требуемый –  $0,45 \text{ кг/с}$ .

6. Определить, во сколько раз и в какую сторону изменилась температура пожара в помещении, если плоскость равных давлений опустилась с 1,7 до 1,2 м. Высота дверного проёма 2,2 м, температура окружающей среды  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

7. Оценить возможные последствия увеличения притока воздуха в помещение при горении нагрузки из твердых горючих материалов. Газообмен осуществляется через один проем размерами  $0,5 \times 1,5$  м. Среднеобъемная температура пожара составляет  $400$  °С, площадь пожара к данному моменту времени достигла  $2$  м<sup>2</sup>, удельная массовая скорость выгорания равна  $0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Предельную концентрацию кислорода принять равной  $15$  % (об.), теоретический объем воздуха для данного горючего материала –  $4,5$  м<sup>3</sup>/кг.

8. Рассчитать высоту нейтральной зоны, если установившийся газообмен осуществляется через два открытых проема. Размеры проемов и их расположение указаны на рис. 2.4.

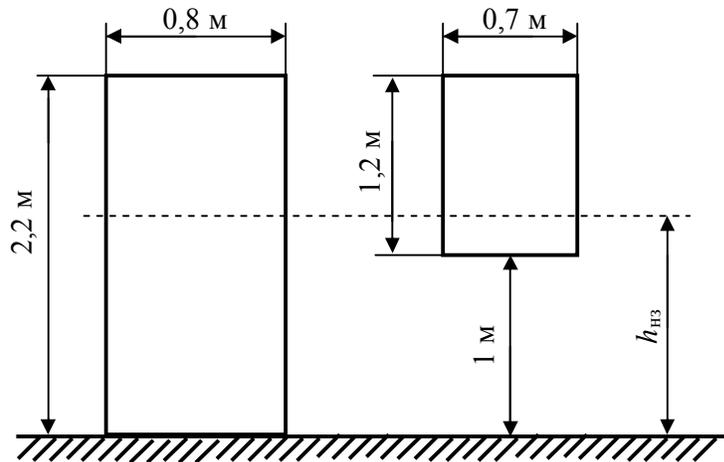


Рис. 2.4. Схема газобмена через дверной и оконный проемы

### Задание для самостоятельной работы

Определить, насколько и в какую сторону изменится один из параметров газобмена на внутреннем пожаре.

Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы.

Требуется определить значение параметра, для которого в табл. 2.1 указано «найти». Для всех вариантов задания коэффициент сопротивления проема  $\mu$  принять равным  $0,65$ .

Таблица 2.1

## Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	$B$ , м	$H$ , м	$h_0$ , м	$\rho_B$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_n$ , °С	$\nu_m^{уд}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$V_B^0$ , м <sup>3</sup> /кг	$S_{n2}$ , м <sup>2</sup>	$\alpha$	$\Phi_{O_2}$ , % (об.)
1	0,8	2,2	0,94	1,25	найти	0,018	4,5	найти	найти	16
2	1,0	1,5	найти	1,28	500	найти	4,2	2,5	3,5	найти
3	0,9	2,0	0,87	1,23	найти	0,014	найти	3,2	найти	17
4	0,7	1,2	найти	1,20	600	0,015	3,8	найти	найти	15
5	0,8	1,6	0,69	1,24	найти	найти	4,0	3,0	4,1	найти
6	0,6	1,7	найти	1,20	660	0,016	найти	4,1	найти	16
7	0,8	1,2	0,52	1,25	найти	0,013	3,9	найти	найти	16
8	1,0	2,1	найти	1,29	640	найти	4,3	3,5	3,8	найти
9	1,2	1,8	0,77	1,22	найти	0,015	найти	4,3	найти	17
10	0,8	1,3	найти	1,24	580	0,016	3,5	найти	найти	15
11	1,0	2,2	0,94	1,23	найти	найти	4,2	4,5	4,4	найти
12	1,2	1,5	найти	1,25	480	0,012	найти	3,8	найти	16
13	0,7	1,4	0,60	1,24	найти	0,013	4,1	найти	найти	17
14	1,1	1,7	найти	1,25	640	найти	4,5	3,5	3,1	найти
15	1,2	1,8	0,78	1,27	найти	0,015	найти	4,3	найти	15
16	0,8	2,0	найти	1,29	560	0,013	5,1	найти	найти	17
17	0,9	2,2	0,96	1,23	найти	найти	4,8	4,0	3,8	найти
18	1,0	1,9	найти	1,26	400	0,016	найти	4,1	найти	16
19	0,7	1,5	0,65	1,24	найти	0,014	4,0	найти	найти	15
20	0,8	1,8	найти	1,28	500	найти	4,1	5,0	4,2	найти
21	1,1	1,7	0,72	1,22	найти	0,018	найти	6,0	найти	17
22	1,0	2,2	найти	1,23	540	0,016	4,5	найти	найти	16
23	0,9	1,9	0,81	1,25	найти	найти	4,4	3,8	4,5	найти
24	0,8	1,8	найти	1,20	620	0,014	найти	5,0	найти	15
25	0,7	1,5	0,64	1,21	найти	0,013	4,2	найти	найти	16
26	0,8	2,2	найти	1,25	540	найти	4,4	3,8	3,5	найти
27	0,8	1,8	0,78	1,20	найти	0,014	найти	5,0	найти	15

Окончание табл. 2.1

№ п/п	$B$ , м	$H$ , м	$h_0$ , м	$\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{п}$ , °С	$v_m^{пр}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$V_v^0$ , м <sup>3</sup> /кг	$S_{п}$ , м <sup>2</sup>	$\alpha$	$\varphi_{O_2}$ , % (об.)
28	0,8	1,5	найти	1,22	450	0,018	4,5	найти	найти	17
29	1,0	2,2	0,93	1,24	найти	Найти	4,3	4,8	3,3	найти
30	0,9	1,8	найти	1,27	430	0,015	найти	4,7	найти	16

Условные обозначения:

$B$ , м – ширина проема;  $H$ , м – высота проема;  $h_0$ , м – высота приточной части проема;  $\rho_v$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха;  $T_{п}$ , °С – температура пожара;  $v_m^{уд}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с) – удельная массовая скорость выгорания;  $V_v^0$ , м<sup>3</sup>/кг – теоретический объем воздуха;  $S_{п}$ , м<sup>2</sup> – площадь пожара;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $\varphi_{O_2}$ , % (об.) – концентрация кислорода в продуктах горения.

## Глава 3

### РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ПОЖАРА В УСЛОВИЯХ НЕОГРАНИЧЕННОГО ГАЗООБМЕНА

*Площадь пожара* – это нормативный параметр, используемый для решения целого ряда практических задач, таких как определение сил и средств для тушения пожара, проектирование автоматических систем пожарной защиты и т. д.

Обозначения:

 – место возникновения пожара;

$S_{п}$  – площадь пожара,  $m^2$ ;

$\tau$  – время, мин;

$S_{п}^{\tau}$  – площадь пожара в момент времени  $\tau$ ,  $m^2$ ;

$L_{\tau}$  – путь, пройденный фронтом пламени к моменту времени  $\tau$ , м;

$v_{л}^{табл}$  – табличное значение линейной скорости распространения пожара, м/мин.

Усреднённые значения линейной скорости  $v_{л}^{табл}$  для разных объектов приведены в таблице прил. 2.

При расчете площади пожара принимается ряд допущений.

*Первое:* горючая нагрузка в помещении однородна и распределена равномерно по всей площади пола.

*Второе:* газообмен не лимитирует скорость и направление распространения пожара, т. е. пожар распространяется в режиме ПРН.

*Третье:* фронт пламени распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Следовательно, расчетная площадь пожара может иметь форму правильных геометрических фигур: круга, полукруга, сектора, прямоугольника (рис. 3.1–3.3).

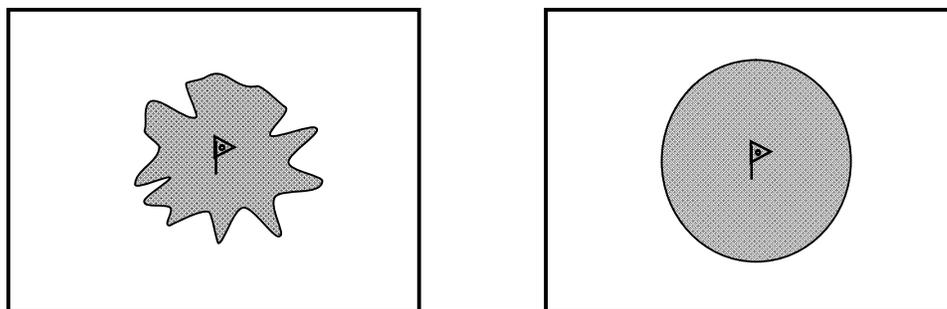


Рис. 3.1. Приведение формы пожара к круговой

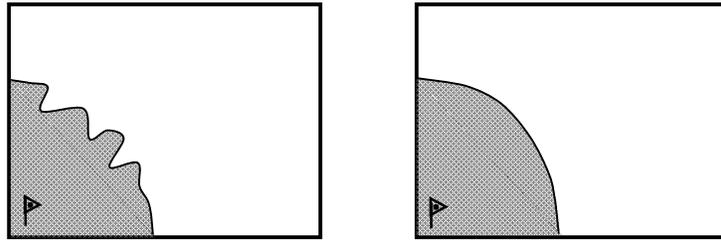


Рис. 3.2. Приведение формы пожара к угловой

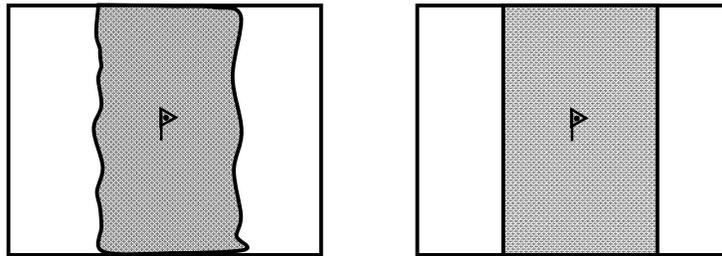


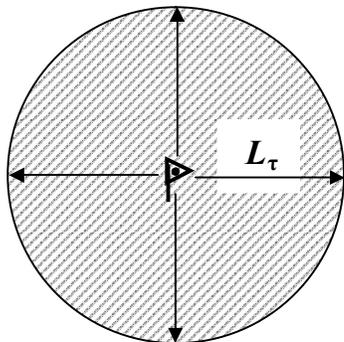
Рис. 3.3. Приведение формы пожара к прямоугольной

*Четвертое:* в первые 10 мин свободного развития пожара линейная скорость распространения  $v_{л}$  равна половине значения, указанного в таблице для соответствующего объекта, т. е. при  $\tau \leq 10$  мин  $v_{л} = 0,5v_{л}^{табл}$ ; при  $\tau > 10$  мин  $v_{л} = v_{л}^{табл}$ .

*Пятое:* когда фронт пламени достигает ограждающей конструкции, он спрямляется.

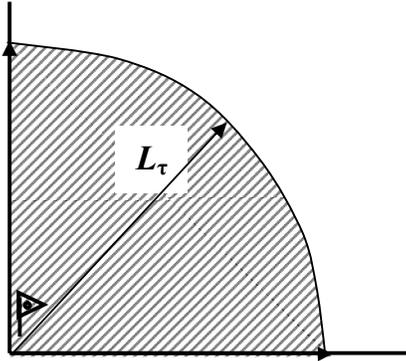
Таким образом, значение площади пожара  $S_{п}$  в каждый момент времени рассчитывается по следующим основным формулам:

1. Круговой пожар



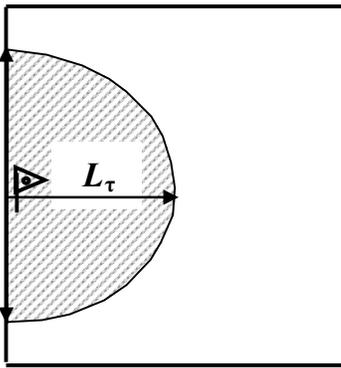
$$S_{п} = \pi L_{\tau}^2 \quad (3.1)$$

2. Пожар, возникший в углу помещения



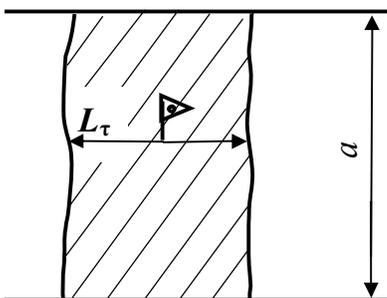
$$S_{\Pi} = \pi L_{\tau}^2 / 4 \quad (3.2)$$

3. Пожар, возникший возле стены



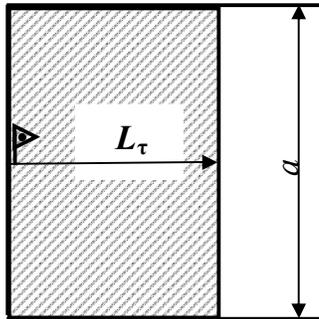
$$S_{\Pi} = \pi L_{\tau}^2 / 2 \quad (3.3)$$

4. Прямоугольная форма пожара (двухсторонняя)



$$S_{\Pi} = 2L_{\tau}a \quad (3.4)$$

## 5. Прямоугольная форма пожара (односторонняя)



$$S_{\text{п}} = aL_{\tau} \quad (3.5)$$

Учитывая, что до 10-й минуты включительно  $v_{\text{л}} = 0,5v_{\text{л}}^{\text{табл}}$ , путь, пройденный фронтом пламени к моменту  $\tau$ , будет равен:

$$L_{\tau} = 0,5v_{\text{л}}^{\text{табл}} \tau \text{ при } \tau \leq 10 \text{ мин}; \quad (3.6)$$

$$L_{\tau} = L_{10} + L_{\tau-10} \text{ при } \tau > 10 \text{ мин}. \quad (3.7)$$

Здесь

$L_{10}$  – путь, который проходит фронт пламени за первые 10 мин;

$$L_{10} = 0,5v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5v_{\text{л}}^{\text{табл}}, \text{ м};$$

$L_{\tau-10}$  – путь, который проходит фронт пламени за время, оставшееся после 10 мин ( $\tau - 10$ ):  $L_{\tau-10} = v_{\text{л}}^{\text{табл}}(\tau - 10)$ , м.

Тогда при  $\tau > 10$  мин

$$L_{\tau} = 5v_{\text{л}}^{\text{табл}} + v_{\text{л}}^{\text{табл}}(\tau - 10) \quad (3.8)$$

или

$$L_{\tau} = v_{\text{л}}^{\text{табл}}(\tau - 5). \quad (3.9)$$

Результаты расчетов представляются в виде плана и графика распространения пожара. Для этого положение фронта пламени отмечается на плане объекта сплошными ровными линиями, на которых указываются расчетные моменты времени. Промежутки между линиями заштриховываются. Полученный таким образом рисунок является планом распространения пожара.

По значениям  $S_{\text{п}}^{\tau}$  в масштабе строится зависимость  $S_{\text{п}} = f(\tau)$ , которая называется *графиком распространения пожара*.

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

- 1) нарисовать план помещения и отметить на нем место возникновения пожара;
- 2) найти  $L_{\tau}$ ;

3) на плане помещения отложить  $L_\tau$ , отметить сплошной ровной линией положение фронта пламени, указать значение  $\tau$ ;

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

5) найти площадь пожара по одной из формул (3.1) – (3.5).

Если момент времени заранее не задан, порядок расчетов, построения плана и графика может быть следующим:

1) нарисовать план помещения и отметить на нем место возникновения пожара;

2) выбрать характерные точки – детали объекта, до которых будет доходить фронт пламени (ограждающие конструкции, перегородки, проемы и т.п.);

3) рассчитать  $L_{10}$  – путь, который проходит фронт пламени за первые 10 мин, т. е. со скоростью  $v_{дл} = 0,5v_{дл}^{табл.}$ ;

4) определить расстояние  $L_\tau$  до первой опорной точки и найти время  $\tau$ , за которое это расстояние будет пройдено, определив его из формулы (3.6), если  $L_\tau \leq L_{10}$ ; из формулы (3.8) или (3.9), если  $L_\tau > L_{10}$ ;

5) определить  $S_{п}^\tau$ , как описано выше;

6) повторить расчеты для всех остальных опорных точек;

7) построить план и график распространения пожара.

Табличные данные, необходимые для решения задач, приведены в приложениях 1 – 6.

### Примеры решения задач

#### Пример 1.

Рассчитать площадь пожара на 5-й, 15-й и 20-й минутах с момента его возникновения (рис. 3.4) и время охвата всего помещения, если скорость распространения равна 1,2 м/мин, предел огнестойкости двери – 12 мин.

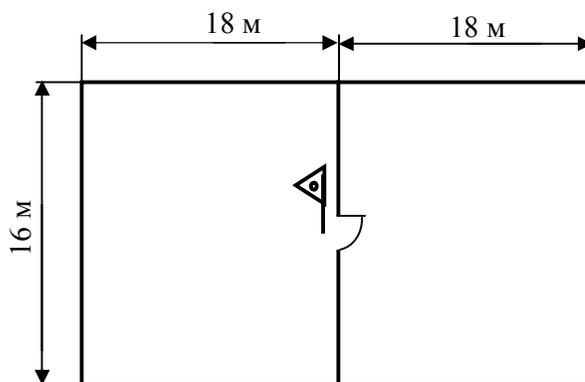


Рис. 3.4. План помещения и место возникновения пожара для примера 1

Решение.

1. Поскольку пожар возник возле двери, отсчет предела ее огнестойкости начнется сразу. Тогда в правое помещение пламя проникнет через 12 мин с момента возникновения пожара. До 12-й минуты пожар будет распространяться только в одном помещении.

2. За 5 мин фронт пламени пройдет расстояние  $L_5 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 5 = 3$  м. До ближайших боковых стен – 8 м. Следовательно, фронт пламени на 5-й минуте будет иметь форму полукруга (рис. 3.5):

$$S_{п}^5 = 3,14 \cdot 3^2 / 2 = 14,0 \text{ м}^2.$$

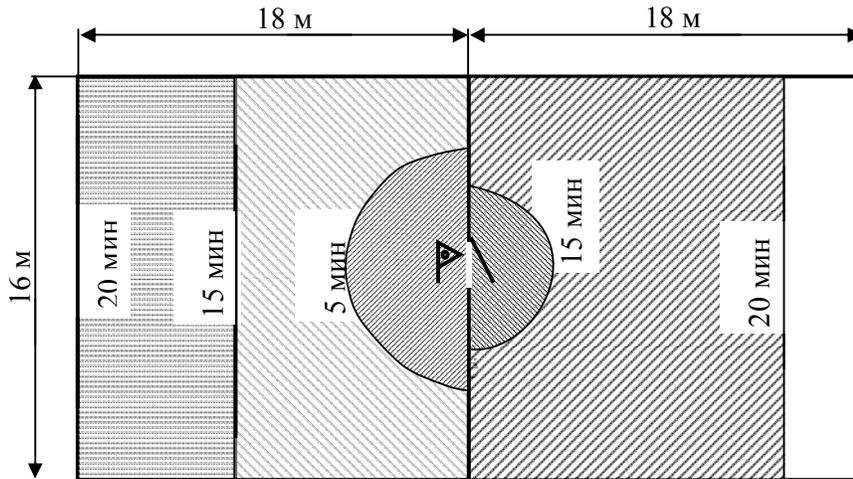


Рис. 3.5. План распространения пожара для примера 1

3. За 15 мин фронт пламени может пройти расстояние  $L_{15} = 5 \cdot 1,2 + 1,2 (15 - 10) = 12$  м. К этому времени в левом помещении он уже достигнет боковых стен и примет форму прямоугольника размером  $16 \times 12$  м.

В смежном помещении он будет распространяться всего  $15 - 12 = 3$  мин (причем скорость его равна  $v_{л}^{\text{табл}}$ , так как  $\tau > 10$  мин).

За это время он пройдет расстояние  $1,2 \cdot 3 = 3,6$  м. Следовательно, в смежном помещении фронт пламени имеет форму полукруга и площадь, равную  $\pi \cdot 3,6^2 / 2 = 20 \text{ м}^2$ . Общая площадь пожара на 15-й минуте

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

4. К 20-й минуте фронт пламени может пройти  $L_{20} = 5 \cdot 1,2 + 1,2 (20 - 10) = 18$  м. Тогда все левое помещение к этому моменту времени будет охвачено пожаром (см. рис. 3.5). Однако в правом помещении он будет распространяться  $20 - 12 = 8$  мин. За это время он пройдет  $1,2 \cdot 8 = 9,6$  м и, достигнув боковых стен, примет форму прямоугольника размером  $16 \times 9,6$  м.

В результате

$$S_{\text{п}}^{20} = 16 \cdot 18 + 16 \cdot 9,6 = 441,6 \text{ м}^2 \approx 442 \text{ м}^2.$$

Полный охват всего помещения наступит, когда фронт пламени пройдет оставшиеся  $18 - 14,6 = 3,4$  м (см. рис. 3.5). При скорости  $1,2$  м/мин это займёт:  $3,4 : 1,2 = 2,8 \approx 3$  мин. Расчетное время охвата всего помещения составляет  $20 + 3 = 23$  мин.

Таким образом,  $S_{\text{п}}^5 = 14 \text{ м}^2$ ;  $S_{\text{п}}^{15} = 212 \text{ м}^2$ ;  $S_{\text{п}}^{20} = 442 \text{ м}^2$ ;  $S_{\text{п}}^{23} = 576 \text{ м}^2$ . По этим данным строим график распространения пожара (рис. 3.6).

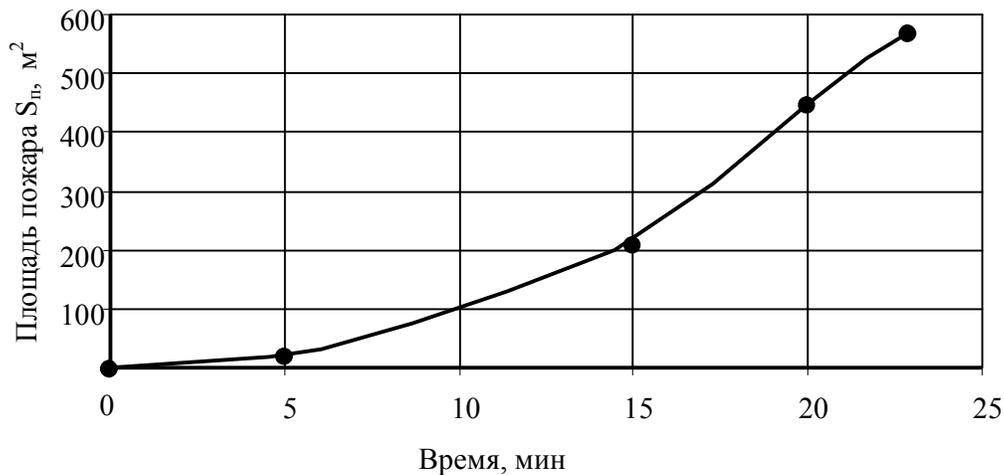


Рис. 3.6. График распространения пожара для примера 1

Пример 2.

Построить график распространения пожара в помещении размерами  $6 \times 10$  м. Табличное значение линейной скорости составляет  $1$  м/мин, очаг возгорания находится в углу (рис. 3.7).

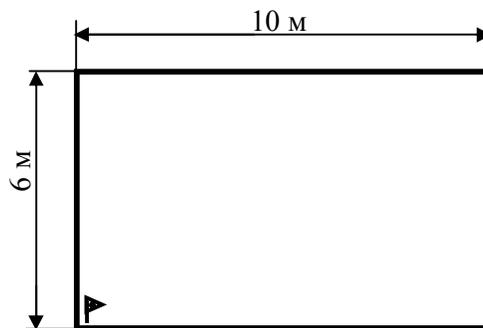


Рис. 3.7. План помещения и место возникновения пожара для примера 2

Решение.

1. За первые десять минут фронт пламени пройдет расстояние

$$L_{10} = 0,5v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 5 \text{ м.}$$

Так как это расстояние меньше, чем длина торцевой стены, площадь пожара на 10-й минуте будет иметь форму сектора радиусом 5 м (рис. 3.8). Площадь данного сектора равна

$$S_{\text{п}}^{10} = \pi L_{10}^2 / 4 = 3,14 \cdot 5^2 / 4 = 19,62 \approx 20 \text{ м}^2.$$

2. Оставшееся расстояние до продольной стены  $\Delta L_1 = 1 \text{ м}$ . На этом и всех последующих участках пути  $v_{\text{л}} = v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 1 \text{ м/мин}$ .

Время  $\Delta \tau_1$ , за которое пожар преодолет расстояние  $\Delta L_1$ , составит:

$$\Delta \tau_1 = \Delta L_1 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 1 / 1 = 1 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара  $\tau = 10 + 1 = 11 \text{ мин}$ . Путь фронта пламени  $L_{11} = 6 \text{ м}$ .

Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь  $S_{\text{п}}^{11}$  рассчитывается как площадь квадрата (см. рис. 3.8):

$$S_{\text{п}}^{11} = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2.$$

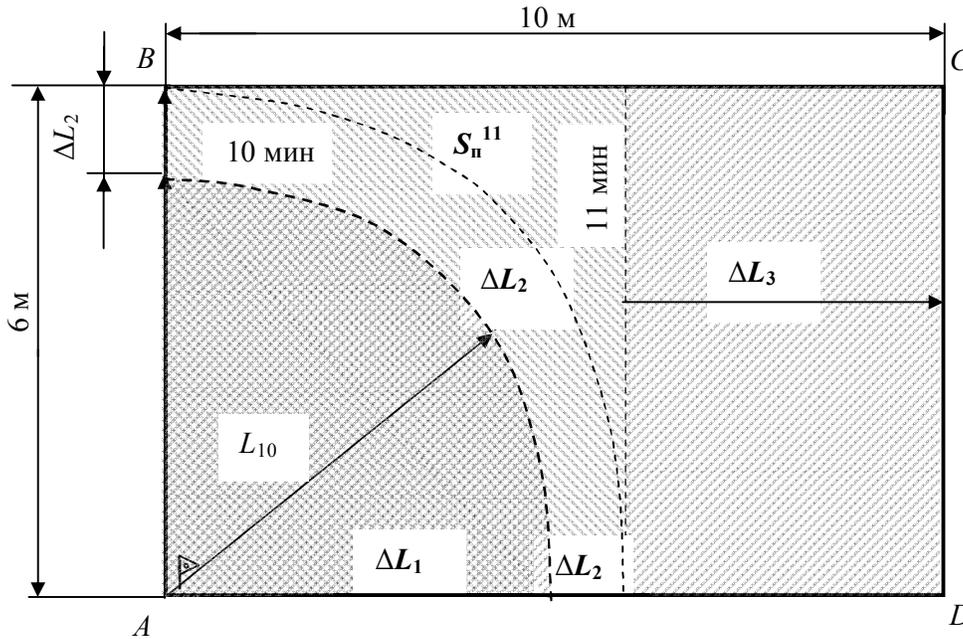


Рис. 3.8. Рабочий вариант плана распространения пожара для примера 2

3. Из плана пожара (см. рис. 3.8) видно, что до противоположной торцевой стены остается расстояние  $\Delta L_2$ :

$$\Delta L_2 = 10 - 6 = 4 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолевает за время

$$\Delta \tau_2 = \Delta L_2 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 4 / 1 = 4 \text{ мин.}$$

Общее время составит  $\tau = 11 + 4 = 15$  мин. К этому моменту пожар охватит всю площадь помещения

$$S_{\text{п}}^{15} = 6 \cdot 10 = 60 \text{ м}^2.$$

Готовый план и график распространения пожара показаны на рис. 3.9 и 3.10 соответственно.

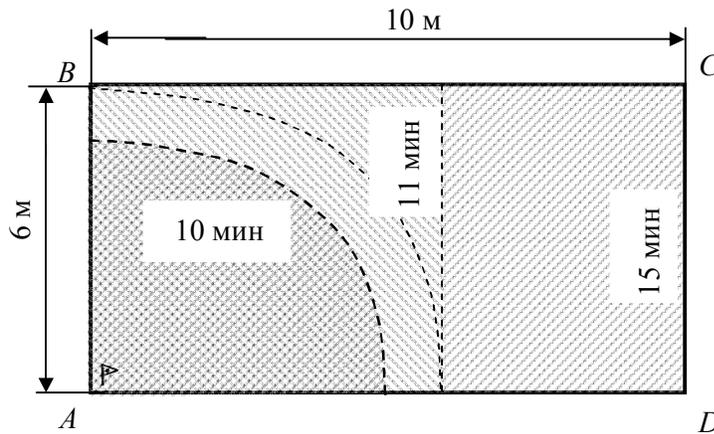


Рис. 3.9. План распространения пожара для примера 2

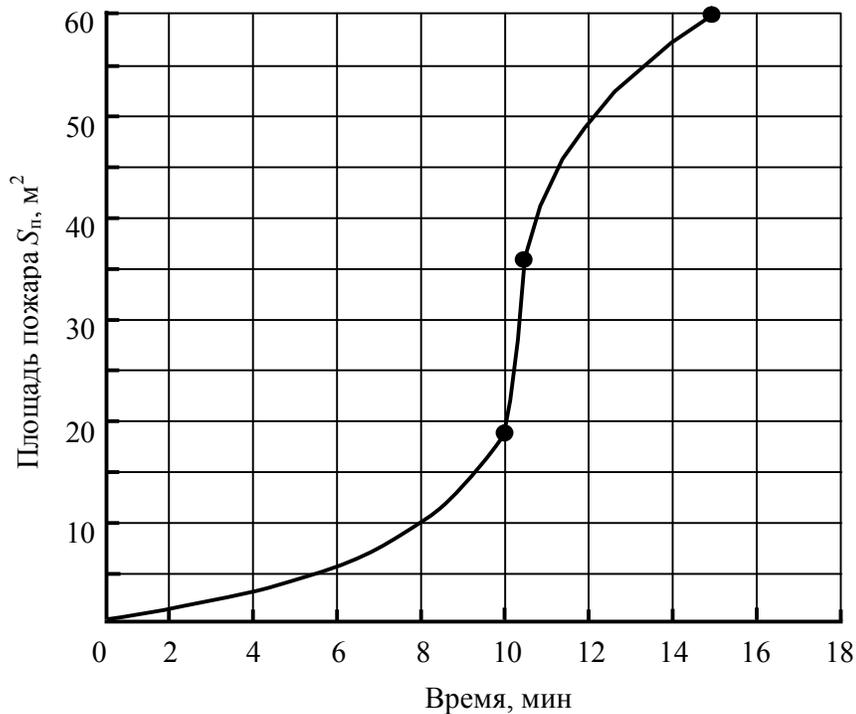


Рис. 3.10. График распространения пожара для примера 2

### Пример 3.

Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом. Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане (рис. 3.11). Очаг возгорания находится возле центра торцевой стены левого помещения. Линейная скорость распространения равна 0,4 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 10 мин.

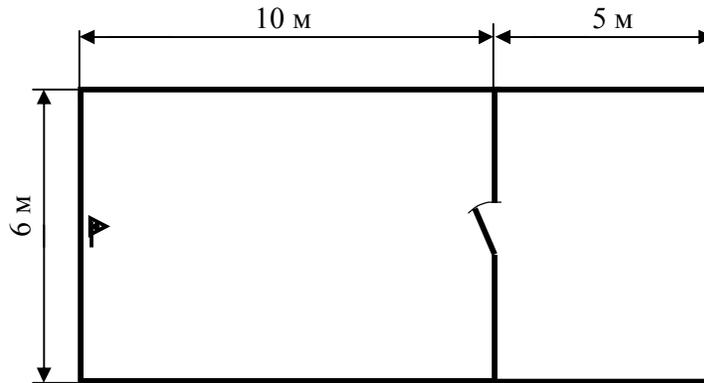


Рис. 3.11. План помещения для примера 3

### Решение.

1. За первые десять минут фронт пламени пройдет расстояние

$$L_{10} = 0,5v_{\text{д}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5v_{\text{д}}^{\text{табл}} = 5 \cdot 0,4 = 2 \text{ м.}$$

Так как это расстояние меньше, чем половина длины торцевой стены, площадь пожара на 10-й минуте будет иметь форму полукруга радиусом 2 м (рис. 3.12). Площадь данного сектора равна

$$S_{\text{п}}^{10} = \pi L_{10}^2 / 4 = 3,14 \cdot 2^2 / 2 = 6,28 \approx 6,3 \text{ м}^2.$$

2. Оставшееся расстояние до продольной стены  $\Delta L_1 = 1 \text{ м}$ . На этом и всех последующих участках пути  $v_{\text{д}} = v_{\text{д}}^{\text{табл}} = 0,4 \text{ м/мин}$ .

Время  $\Delta\tau_1$ , за которое пожар преодолеет расстояние  $\Delta L_1$ , составит:

$$\Delta\tau_1 = \Delta L_1 / v_{\text{д}}^{\text{табл}} = 1 / 0,4 = 2,5 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара  $\tau = 10 + 2,5 = 12,5 \text{ мин}$ . Путь фронта пламени  $L_{12,5} = 3 \text{ м}$ .

Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь  $S_{\text{п}}^{12,5}$  рассчитывается как площадь прямоугольника (см. рис. 3.12):

$$S_{\text{п}}^{12,5} = 6 \cdot 3 = 18 \text{ м}^2.$$

3. Из плана пожара (см. рис. 3.12) видно, что до перегородки остается расстояние

$$\Delta L_2 = 10 - 3 = 7 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время

$$\Delta\tau_2 = \Delta L_2 / v_{\text{д}}^{\text{табл}} = 7 / 0,4 = 17,5 \text{ мин.}$$

Время распространения составит  $\tau = 12,5 + 17,5 = 30$  мин. К этому моменту пожар охватит всю левую часть помещения:

$$S_{\text{п}}^{30} = 6 \cdot 10 = 60 \text{ м}^2.$$

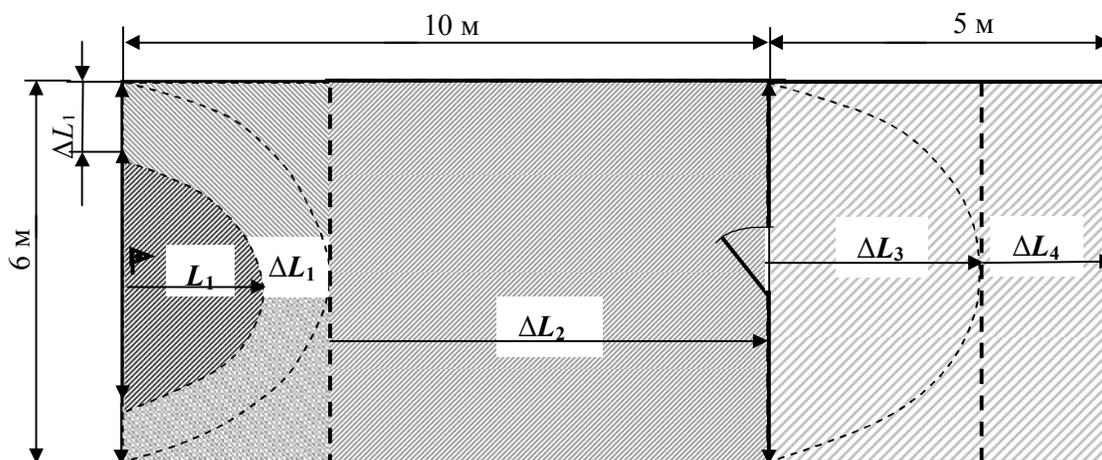


Рис. 3.12. Рабочий вариант плана распространения пожара для примера 3

4. Предел огнестойкости двери 10 мин. В этот промежуток времени площадь пожара будет неизменной. Рост площади пожара продолжится через  $30 + 10 = 40$  мин. Поэтому

$$S_{\text{п}}^{30} = S_{\text{п}}^{40} = 60 \text{ м}^2.$$

5. Принимается, что в правой части помещения распространение фронта пламени начнется от центра двери. Так как пожар к этому времени уже развившийся,  $v_{\text{л}} = v_{\text{л}}^{\text{табл}}$ .

Расстояние от центра двери до ближайшей стены  $\Delta L_3 = 3$  м. Фронт пламени его пройдет за время  $\Delta \tau_3$

$$\Delta \tau_3 = \Delta L_3 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 3 / 0,4 = 7,5 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара  $\tau = 40 + 7,5 = 47,5$  мин. Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь в данной части помещения  $\Delta S_3 = 6 \cdot \Delta L_3 = 6 \cdot 3 = 18 \text{ м}^2$ . Площадь пожара на данный момент времени (см. рис. 3.10)

$$S_{\text{п}}^{47,5} = 60 + 18 = 78 \text{ м}^2.$$

6. Из плана пожара (см. рис. 3.12) видно, что до правой торцевой стены остается расстояние

$$\Delta L_4 = 5 - 3 = 2 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолет за время  $\Delta \tau_4$ :

$$\Delta \tau_4 = \Delta L_4 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 2 / 0,4 = 5 \text{ мин.}$$

Общее время составит  $\tau = 47,5 + 5 = 52,5 \approx 53$  мин. К этому моменту пожар охватит всю площадь помещения:

$$S_{\text{п}}^{53} = 6 \cdot 15 = 90 \text{ м}^2.$$

Готовый план и график распространения пожара показаны на рис. 3.13 и 3.14 соответственно.

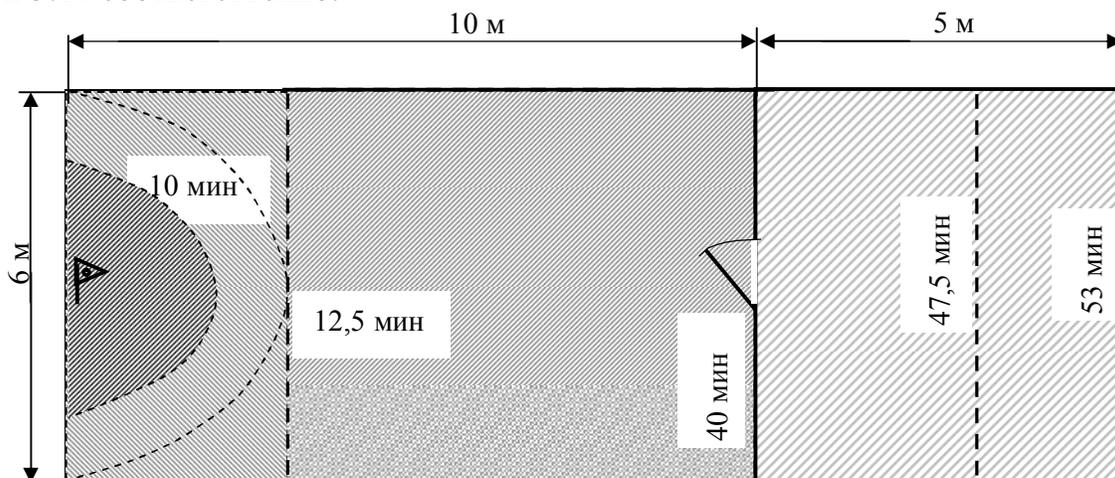


Рис. 3.13. План развития пожара для примера 3

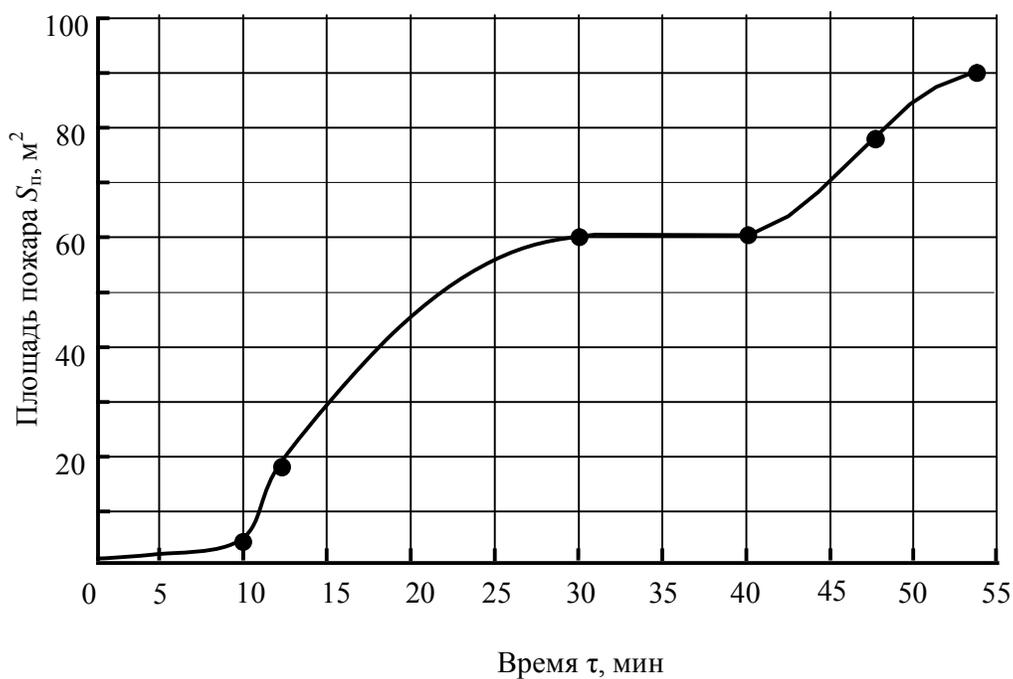


Рис. 3.14. График распространения пожара для примера 3

#### Пример 4.

Определить линейную скорость распространения пожара в помещении размерами  $5 \times 12$  м, если на 14-й минуте его площадь составила 60 % от площади пола. Пожар возник в углу помещения (рис. 3.15).

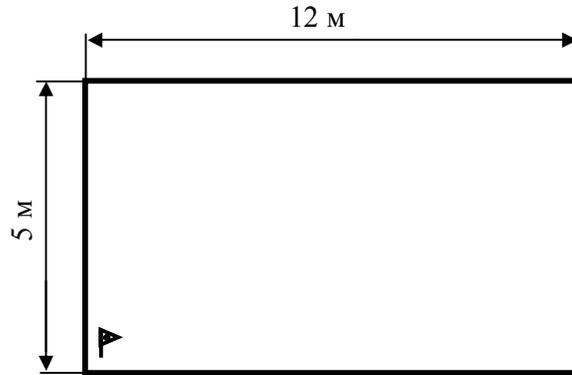


Рис. 3.15. План помещения для примера 4

Р е ш е н и е.

1. Площадь пожара на 14-й минуте составила  

$$S_{п}^{14} = 0,6 \cdot 5 \cdot 12 = 36 \text{ м}^2.$$

2. Возможны два варианта формы площади пожара: сектор или прямоугольник. Данная площадь могла иметь форму сектора, квадрата или прямоугольника.

Форма сектора получается, если  $L_{14} < a$  (см. рис. 3.5).

Тогда

$$S_{п}^{14} = \pi L_{14}^2 / 4 = 36 \text{ м}^2.$$

Откуда

$$L_{14} = \sqrt{36 \cdot 4 / \pi} = 6,8 \text{ м}.$$

Так как  $L_{14} > a$ , к данному моменту времени фронт пламени достиг продольной стены и принял форму прямоугольника размерами  $a \times L_{14}$  (рис. 3.16).

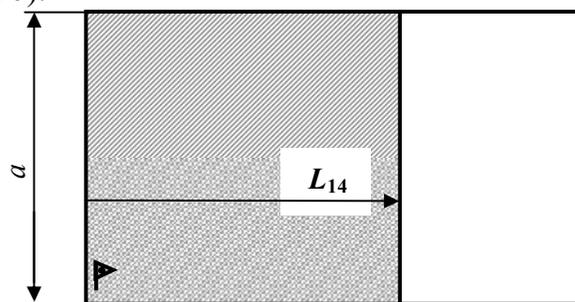


Рис. 3.16. Форма площади пожара на 14-й минуте

Откуда

$$L_{14} = S_{п}^{14} / a = 36 / 5 = 7,2 \text{ м}.$$

Зная  $L_{14}$ , выразим  $v_{л}$  из формулы (3.9)

$$v_{л} = \frac{L_{\tau}}{(\tau - 5)} = \frac{7,2}{14 - 5} = 0,8 \text{ м/мин.}$$

### Контрольные задачи

1. Построить план и график распространения пожара в помещении размерами  $6 \times 10$  м, если линейная скорость составляет  $0,5$  м/мин, очаг возгорания находится в центре (рис. 3.17).

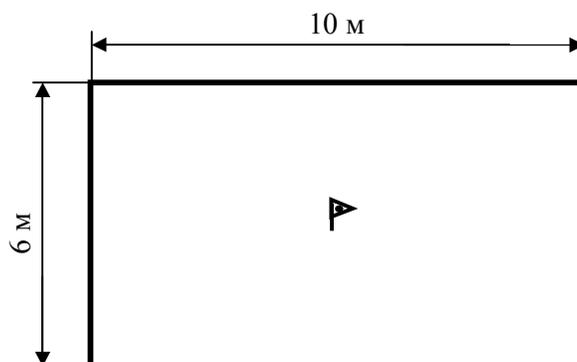


Рис. 3.17. План помещения для задачи 1

2. Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом. Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане (рис. 3.18). Очаг возгорания находится в углу левой части помещения. Линейная скорость распространения равна  $0,5$  м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 10 мин.

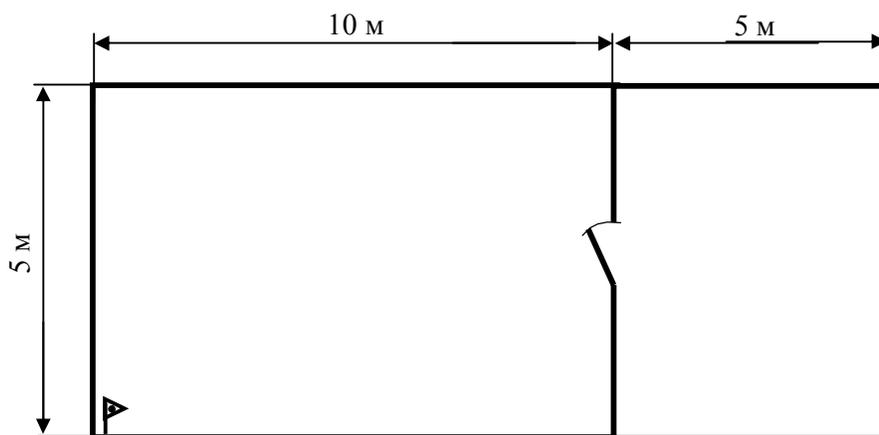


Рис. 3.18. План помещения для задачи 2

3. По исходным данным задачи 2 построить план и график распространения пожара, если очаг возгорания находится в дальнем углу правой части помещения (рис. 3.19).

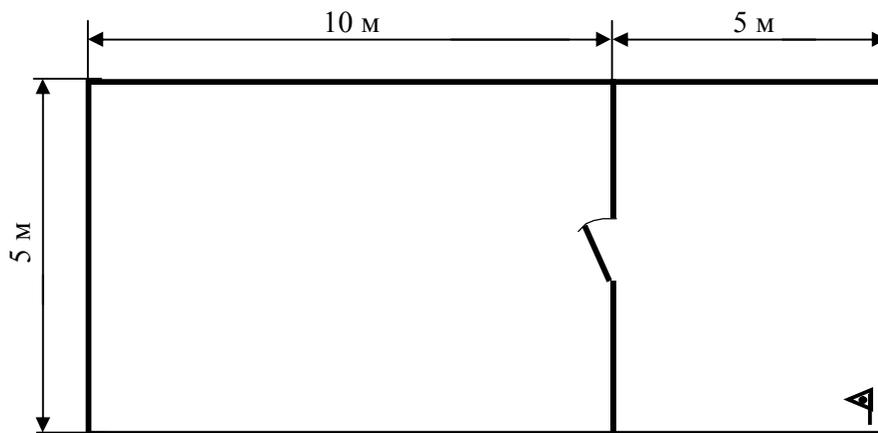


Рис. 3.19. План помещения для задачи 3

4. По исходным данным задачи 2 построить план и график распространения пожара, если очаг возгорания находится в ближнем углу правой части помещения (рис. 3.20).

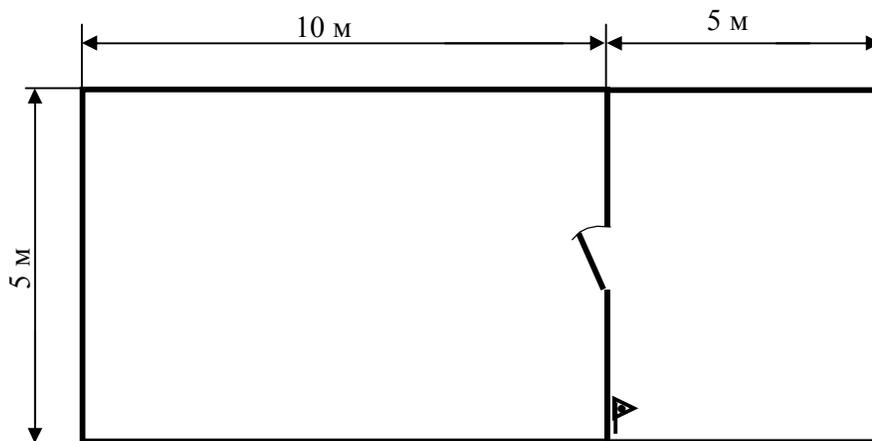


Рис. 3.20. План помещения для задачи 4

5. По исходным данным задачи 2 построить план и график распространения пожара, если очаг возгорания находится в середине торцевой стены правой части помещения (рис. 3.21).

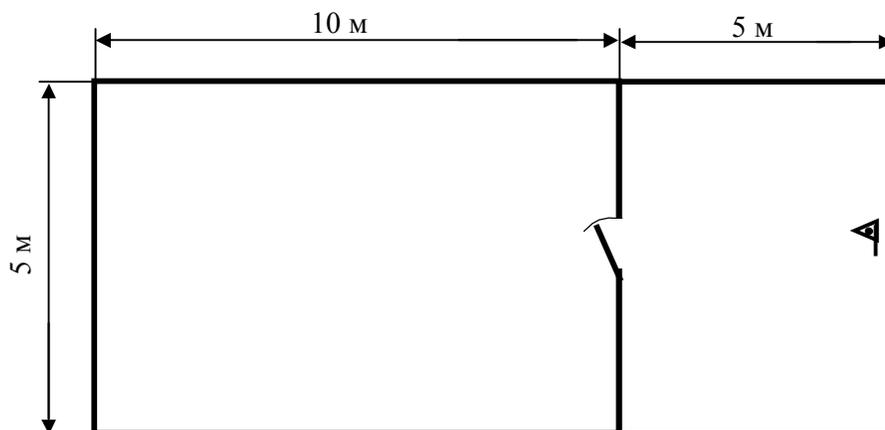


Рис. 3.21. План помещения для задачи 5

6. Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом. Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане (рис. 3.22). Очаг возгорания находится в углу левой части помещения. Линейная скорость распространения равна 1,0 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 10 мин.

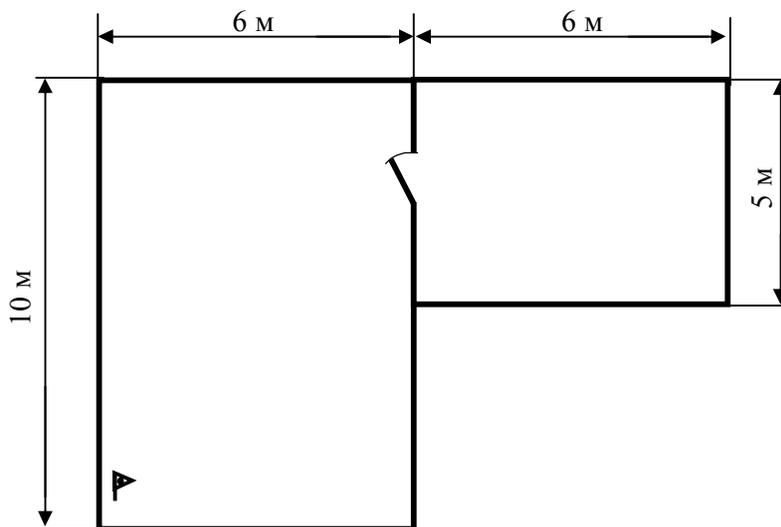


Рис. 3.22. План помещения для задачи 6

7. Определить линейную скорость распространения пожара в помещении размерами 6×15 м, если на 12-й минуте площадь пожара составила 70 % от площади пола. Пожар возник в центре помещения (рис. 3.23).

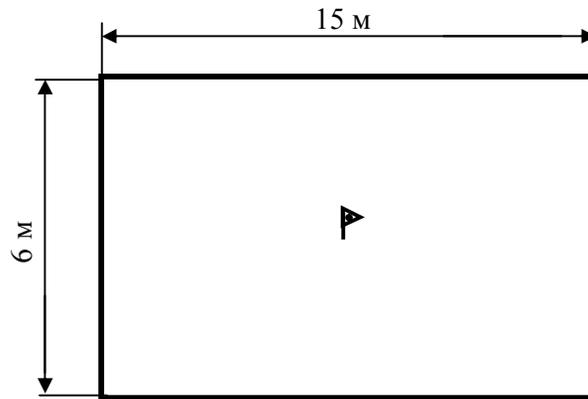


Рис. 3.23. План помещения для задачи 7

8. По исходным данным задачи 7 определить линейную скорость распространения пожара, если пожар возник в середине торцевой стены (рис. 3.24).

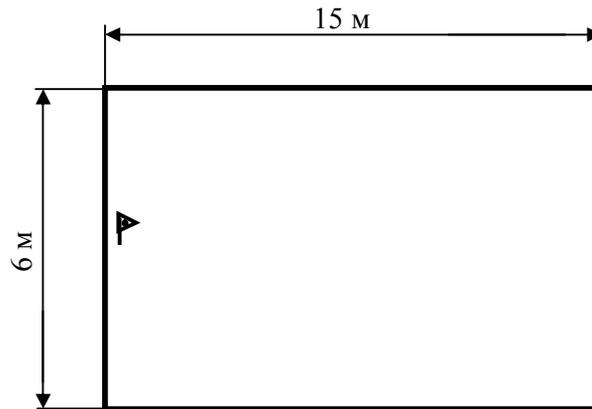


Рис. 3.24. План помещения для задачи 8

### Задание для самостоятельной работы

Построить план и график распространения пожара в помещении (рис. 3.25–3.27) на моменты времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$ . Определить время полного охвата пожаром помещения.

Размеры комнат помещения указаны в табл. 3.1, табличная линейная скорость распространения, очаг возгорания, значения  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  приведены в табл. 3.2. Предел огнестойкости двери – 10 мин.

Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы.

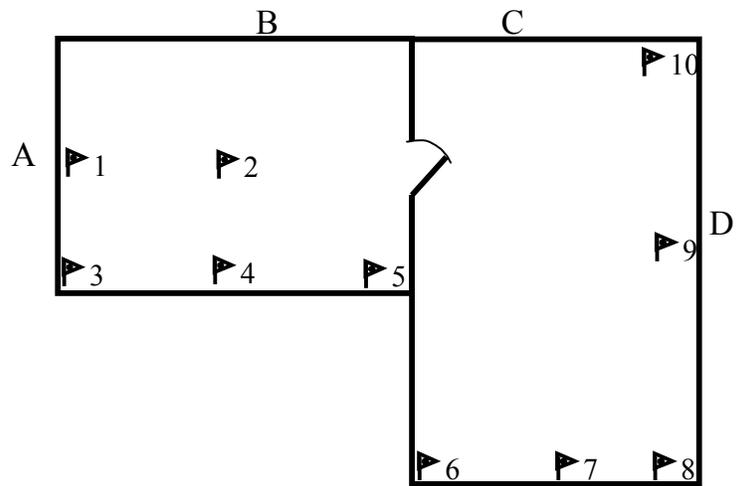


Рис. 3.25. Схема помещения для вариантов 1 – 10

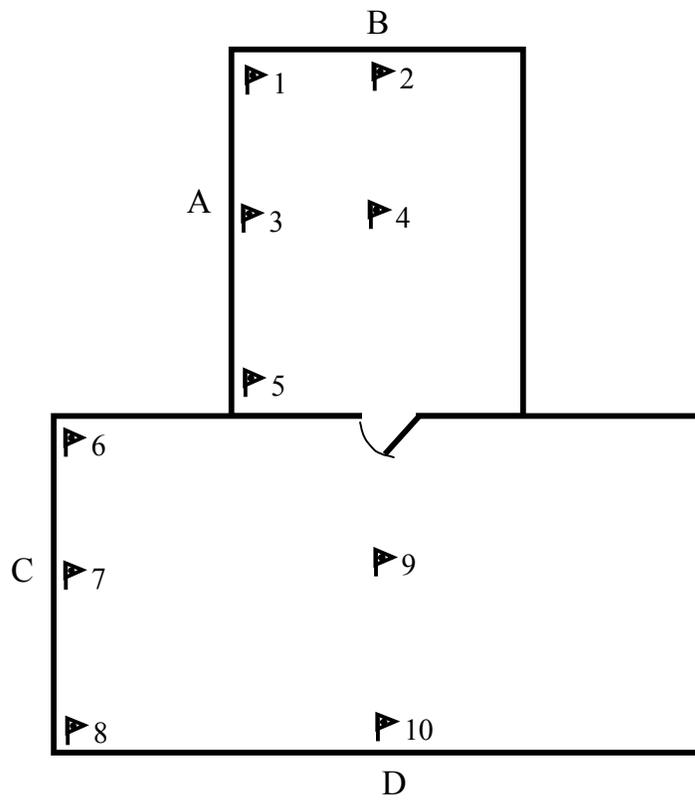


Рис. 3.26. Схема помещения для вариантов 11 – 20

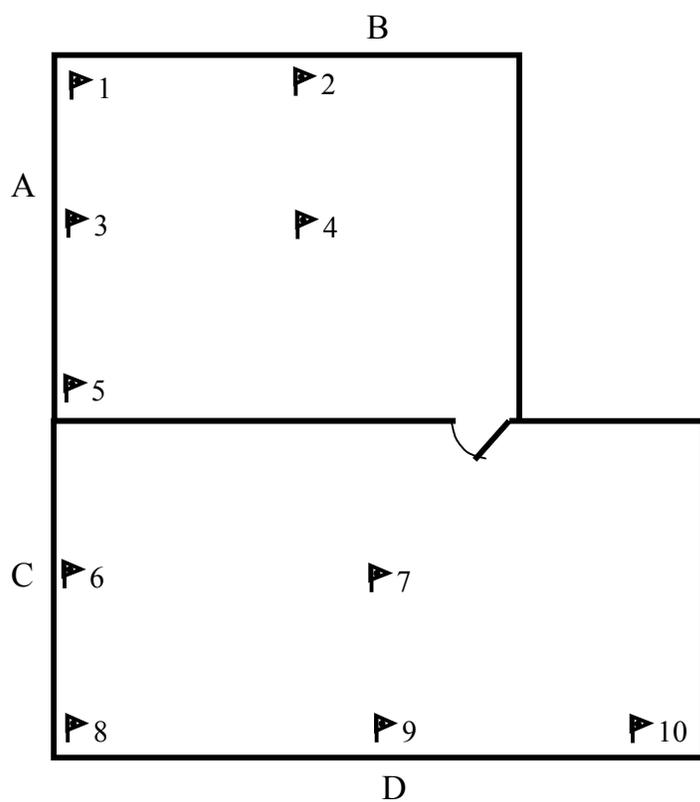


Рис. 3.27. Схема помещения для вариантов 21 – 30

Таблица 3.1

**Размеры помещений**

Номер варианта задания	Номер рисунка	A, м	B, м	C, м	D, м
1	3.25	5	6	5	10
2		6	7	5	9
3		5	8	6	10
4		8	8	6	8
5		5	6	7	7
6		7	7	7	14
7		7	8	8	12
8		6	8	7	14
9		5	6	5	10
10		8	8	6	12

Окончание табл. 3.1

Номер варианта задания	Номер рисунка	А, м	В, м	С, м	Д, м
11	3.26	6	5	5	10
12		7	6	6	9
13		8	5	8	12
14		8	8	6	10
15		6	5	7	16
16		7	7	8	14
17		8	7	7	12
18		8	6	5	10
19		6	5	8	16
20		8	10	6	14
21	3.27	5	6	5	10
22		6	7	5	9
23		5	8	6	10
24		8	8	6	8
25		5	6	7	7
26		7	7	7	14
27		7	8	8	12
28		6	8	7	14
29		5	6	5	10
30		8	8	6	12

Таблица 3.2

**Исходные данные для расчета**

Номер варианта задания	Положение очага $\blacktriangleright i$	Линейная скорость распространения, м/мин	Время $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ , мин
1	1	0,6	5, 12, 17, 20
2	3	0,5	6, 15, 20, 25
3	2	0,4	4, 10, 19, 23
4	5	0,4	5, 8, 16, 24
5	6	1	5, 14, 18, 25
6	4	0,5	6, 12, 15, 20
7	7	0,6	3, 15, 17, 21
8	8	0,5	7, 15, 20, 26
9	9	1	4, 12, 18, 25
10	10	0,8	5, 15, 20, 23

Окончание табл. 3.2

Номер варианта задания	Положение очага $\blacktriangleright i$	Линейная скорость распространения, м/мин	Время $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ , мин
11	1	0,6	5, 12, 17, 22
12	3	0,5	6, 15, 20, 25
13	2	0,4	4, 10, 19, 24
14	5	0,4	5, 8, 16, 20
15	6	1	5, 14, 18, 23
16	4	0,5	6, 12, 15, 22
17	7	0,6	3, 15, 17, 21
18	8	0,5	7, 15, 20, 25
19	9	1	4, 12, 18, 24
20	10	0,8	5, 15, 20, 25
21	1	0,6	5, 12, 17, 23
22	3	0,5	6, 15, 20, 24
23	2	0,4	4, 10, 19, 26
24	5	0,4	5, 8, 16, 20
25	6	1	5, 14, 18, 22
26	4	0,5	6, 12, 15, 21
27	7	0,6	3, 15, 17, 23
28	8	0,5	7, 15, 20, 25
29	9	1	4, 12, 18, 24
30	10	0,8	5, 15, 20, 26

## Глава 4

### ПАРАМЕТРЫ ТУШЕНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Согласно тепловой теории потухания, прекращение пламенного горения наступает в результате понижения температуры пламени до некоторого критического значения, называемого *температурой потухания*  $T_{\text{пот}}$ . При тушении пожаров, как правило, это достигается применением различных огнетушащих веществ.

При этом одни огнетушащие вещества воздействуют главным образом на процессы, протекающие непосредственно в объеме зоны горения, и практически не затрагивают поверхность конденсированного горючего. Это вещества, применяемые в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии: нейтральные газы, химически активные ингибиторы, аэрозоли и т. д. Другие оказывают косвенное воздействие на процессы, протекающие в газовой фазе. С их помощью уменьшают выход горючих газов путем охлаждения поверхности горючего или ее изолирования от зоны горения (пены, порошки).

Кроме того, некоторые огнетушащие вещества способны работать одновременно в газовой фазе и на поверхности горючего. Например, распыленная вода в зависимости от размера капель может: *полностью испаряться в пламени*, оказывая объемное действие только на зону горения; *частично испаряться в пламени*, оказывая и объемное, и поверхностное действие; *практически не взаимодействовать* с пламенем, оказывая чисто поверхностное действие.

На практике применяются два основных способа подачи огнетушащих веществ: в объем зоны горения («тушение по объему») и на поверхность горючего («тушение по поверхности»).

*При объемном тушении* огнетушащее вещество может подаваться локально, т. е. непосредственно в зону горения – над локальным очагом пожара, в факел газового фонтана или в объем помещения – тушение методом затопления. В обоих случаях горение прекращается, когда концентрация подаваемого вещества становится равной огнетушащей и температура пламени снижается до температуры потухания.

*При тушении по поверхности* температура пламени достигает температуры потухания и горение прекращается, когда массовая скорость выгорания падает ниже предельного значения, при котором концентрация горючих газов или паров над поверхностью становится меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР).

В целом процесс тушения для всех видов горючих веществ и материалов характеризуется следующими параметрами:

*Время тушения*  $\tau_t$ , с, мин, – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения.

*Интенсивность подачи*  $J$ , л/(м<sup>2</sup>·с) – количество огнетушащего вещества, подаваемое на 1 м<sup>2</sup> площади пожара в секунду.

*Удельный расход*  $q_{уд}$  – количество огнетушащего вещества, л, кг, израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м<sup>2</sup> площади пожара, либо на 1 м<sup>3</sup> объема помещения, либо на 1 м<sup>3</sup> фонтанирующего газа.

Время тушения и затраты огнетушащего вещества зависят от интенсивности подачи. Характерные графики зависимости времени тушения и удельного расхода от интенсивности подачи показаны на рис. 4.1. График 1 на данном рисунке называется «кривая тушения».

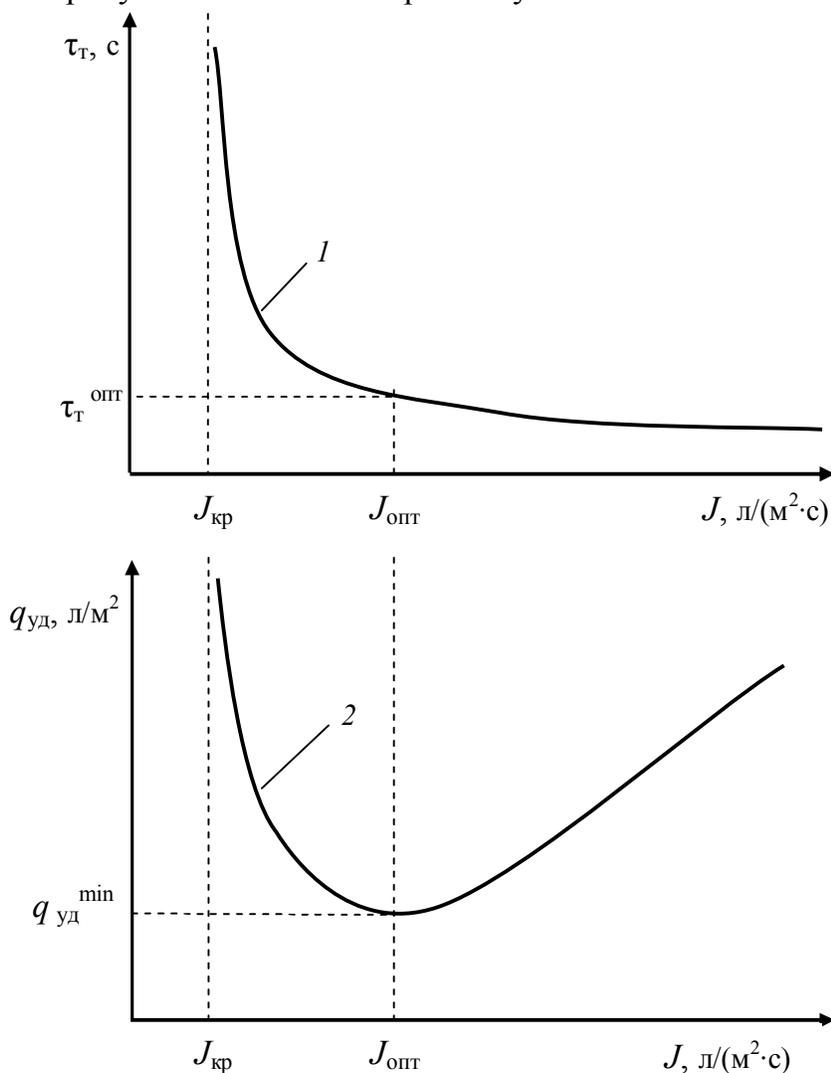


Рис. 4.1. Зависимость времени тушения 1 и удельного расхода 2 от интенсивности подачи огнетушащего вещества

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивности подачи. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества оказывается равной критической, тушение не достигается,  $\tau_t \rightarrow \infty$ . При тушении пенами критической является интенсивность подачи, равная интенсивности разрушения пены; при тушении газовыми составами и аэрозолями – интенсивность утечки огнетушащего вещества из заполняемого объема помещения; при тушении водой по поверхности – интенсивность подачи, компенсирующая лучистый тепловой поток к горящей поверхности от собственного пламени и внешних источников излучения.

Интенсивность подачи, при которой удельный расход огнетушащего вещества минимален, считается оптимальной  $J_{\text{опт}}$ .

Эффективность применяемого огнетушащего вещества и способа подачи можно оценить с помощью показателя эффективности тушения  $\Pi_{\text{эТ}}$  и коэффициента использования  $K_{\text{и}}$ .

Выбор огнетушащих веществ и способов их подачи зависит от того, какие условия необходимы и достаточны для прекращения горения данного вида горючего вещества в данных условиях пожара.

### Прекращение горения газов (газовых фонтанов)

Для прекращения горения газов необходимо и достаточно отобрать непосредственно от зоны горения такое количество теплоты, чтобы температура факела понизилась до температуры потухания. Охлаждать исходное горючее или окислитель в данном случае бесполезно, так как газы воспламеняются и горят при любой реально достижимой температуре. При этом механизмы отбора тепла в объеме пламени зависят от применяемого огнетушащего вещества.

Удельное количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения для снижения температуры пламени до температуры потухания  $Q^{\text{треб}}$ , кДж/м<sup>3</sup>, находится по следующим формулам:

$$Q^{\text{треб}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{пг}i} (H_{\text{г}i} - H_{\text{пот}i}); \quad (4.1)$$

$$\text{или} \\ Q^{\text{треб}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{пг}}^{T_{\text{пот}}}, \quad (4.2)$$

где  $V_{\text{пг}i}$  – удельный объем  $i$ -го продукта горения, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $H_{\text{г}i}$  и  $H_{\text{пот}i}$  – энтальпия  $i$ -го продукта горения при температурах горения и потухания соответственно, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{н}}$  – низшая теплота сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{пг}}^{T_{\text{пот}}}$  – суммарное удельное теплосодержание продуктов горения стехиометрической смеси при температуре потухания, кДж/м<sup>3</sup>.

За температуру потухания принимается адиабатическая температура горения предельно обедненной газовой смеси – смеси на НКПР. Методика расчета температуры горения изложена в учебных пособиях [1, 2].

Температура горения смеси газов на НКПР находится с учетом избытка воздуха  $\Delta V_B$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, в ее составе, который находится по известной формуле

$$\Delta V_B = V_B^0(\alpha_H - 1), \quad (4.3)$$

где  $V_B^0$  – теоретический объем воздуха, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\alpha_H$  – коэффициент избытка воздуха на нижнем концентрационном пределе.

Здесь

$$\alpha_H = \frac{100 - \varphi_H}{V_B^0 \varphi_H}, \quad (4.4)$$

где  $\varphi_H$  – нижний концентрационный предел распространения пламени, % (об.).

Температуру потухания можно оценить также по эффективной энергии активации реакции горения:

$$T_{\text{пот}}^0 = T_{\text{г}}^0 \left(1 - \frac{3RT_{\text{г}}^0}{E}\right), \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{г}}^0$  – адиабатическая температура горения, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,31кДж/(моль·К);  $E$  – эффективная энергия активации реакции горения данного вещества.

Подавать огнетушащие вещества в зону горения можно различными техническими средствами как извне, так и вместе с потоком горючего или окислителя. Например, на тушение газового фонтана воду можно подавать извне лафетными стволами, автомобилями газоводяного тушения, а также закачкой внутрь фонтанирующей скважины. Наиболее эффективным способом тушения пламени газового фонтана является импульсная (залповая) подача огнетушащего порошка в объем зоны горения.

## Прекращение горения жидкостей

Необходимым условием для тушения жидкости также является прекращение горения в газовой фазе. Если удастся создать условия, требуемые для потухания пламени во всем объеме зоны горения одновременно, то (при отсутствии внешних источников зажигания и температуре окружающей среды ниже температуры самовоспламенения) этого будет также и достаточно для тушения пожара. Это достигается подачей огнетушащих

веществ объемного или объемно-поверхностного действия (газовых или порошковых составов) различными техническими средствами либо непосредственно в зону горения, либо в объем помещения (газовые или аэрозольобразующие составы).

Вместе с тем прекратить горение жидкости можно уменьшая скорость испарения путем отвода тепла не от пламени, а от поверхностного слоя. По мере уменьшения концентрации горючего в зоне горения температура пламени понижается. Если температуру поверхности понизить до температуры вспышки, концентрация горючего над поверхностью упадет до нижнего концентрационного предела, температура пламени достигнет температуры потухания и горение прекратится.

Условием *необходимым и достаточным* для тушения жидкости охлаждением поверхности является понижение ее температуры от температуры кипения до температуры вспышки. Физически это означает, что массовую скорость выгорания надо уменьшить до такого минимального значения, при котором концентрация пара над поверхностью не превышает нижний концентрационный предел распространения пламени. Для этого интенсивность теплоотвода должна быть не ниже интенсивности теплового потока, затрачиваемого в единицу времени на образование горючей концентрации пара над поверхностью жидкости и формирование прогретого слоя. Для жидкостей данное условие описывается следующим уравнением:

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = [c (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}} + Q_{\text{зап}}/\tau_{\text{т}}, \quad (4.6)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);  $T_{\text{кип}}$  и  $T_{\text{всп}}$  – температура кипения и вспышки соответственно, °С;  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $Q_{\text{зап}}$  – количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое, кДж/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Тепло  $Q_{\text{зап}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \quad (4.7)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К);  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Если огнетушащее вещество подается с интенсивностью  $J$ , поступает на поверхность прогретого слоя без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность  $Q_{\text{охл}}$ , то интенсивность теплоотвода будет равна  $JQ_{\text{охл}}$ . Из уравнения (4.6) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_M^{\text{уд}}}, \quad (4.8)$$

где  $Q_{\text{охл}}$  – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л или кДж/кг.

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества – это максимальное количество тепла, которое может быть отведено единицей объема или массы огнетушащего вещества от  $1 \text{ м}^2$  поверхности горения или  $1 \text{ м}^3$  объема зоны горения.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель формулы (4.8) обращается в 0, является критической. В этом случае  $\tau_T \rightarrow \infty$  и тушение становится невозможным. Из формулы (4.8) следует, что критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества  $J_{\text{кр}}$ , л/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) или кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ), при таком способе тушения жидкости равна

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_M^{\text{уд}}}{Q_{\text{охл}}}. \quad (4.9)$$

Выбор конкретного огнетушащего вещества зависит от его способности выполнить все условия, необходимые и достаточные для прекращения горения. Например, очевидно, что охладить гептан водой до температуры вспышки  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  физически невозможно. Для этой цели, в данном случае, подходят: жидкий азот, твердая гранулированная углекислота или другие огнетушащие вещества с температурой кипения ниже  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если по каким-то причинам они недоступны, следует изолировать зону горения от поверхности жидкости слоем пены. При этом сначала уменьшается скорость испарения, что приводит к понижению температуры пламени до температуры потухания вследствие уменьшения концентрации горючего в зоне химических реакций. Затем выход пара прекращается, и пока слой пены или порошка сохраняет изолирующую способность, повторное воспламенение жидкости становится невозможным.

## Прекращение горения твердых горючих материалов

Гомогенное (пламенное) горение твердых горючих материалов (ТГМ) обусловлено образованием горючих газов в результате термического разложения вещества – пиролиза.

Для гомогенного горения необходимо, чтобы скорость выделения газообразных продуктов пиролиза и приток воздуха были достаточны для образования над поверхностью материала горючей смеси, т. е. смеси, в которой концентрация горючего газа не ниже НКПР.

Непрерывное поступление горючих паров и газов в зону горения поддерживается интенсивным тепловым потоком к поверхности ТГМ от собственного пламени и внешних источников.

Пиролиз некоторых ТГМ начинается после плавления и протекает в тонком поверхностном слое. Как правило, это линейные несшитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Такие материалы, подобно жидкости, выгорают без остатка. Удельное количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое плавящихся материалов  $Q_{\text{зап}}$ , определяется по формуле (4.7).

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древеснонаполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, сшитые полимерные материалы – реактопласты. Для них характерны два вида горения – гомогенное (пламенное) и гетерогенное (тление). Их соотношение зависит от интенсивности тепло- и газообмена у поверхности горения. В процессе горения углистый слой аккумулирует значительное количество тепла. Температура его поверхности достигает 600 – 700 °С, что является достаточным для зажигания горючих газовых смесей.

Удельный запас тепла  $Q_{\text{зап}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения, равен

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \tau_{\text{гор}}, \quad (4.10)$$

где  $q_{\text{зап}}$  – тепловой поток, аккумулируемый пиролизующимся слоем, кВт/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{гор}}$  – время свободного горения, с.

Значение  $q_{\text{зап}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, определяется из уравнения теплового баланса горения:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \quad (4.11)$$

где  $q_{\text{вн}}$  – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м<sup>2</sup>;  $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$  – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $L$  – теплота, затрачиваемая на пиролиз (газификацию) материала, кДж/кг;  $L_{\text{экз}}$  – экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза, кДж/кг;  $q_{\text{конв}}$  – конвективный тепловой поток, исходящий от поверхности, кВт/м<sup>2</sup>.

Откуда

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}. \quad (4.12)$$

Величина  $q_{\text{конв}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \quad (4.13)$$

где  $c_p$  – средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур  $T_{\text{пов}}$  –  $T_{\text{пир}}$ ,  $c_p \approx 3,7$  кДж/(кг·К);  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности при горении,  $T_{\text{пов}} \approx 700$  °С;  $T_{\text{пир}}$  – температура пиролиза,  $T_{\text{пир}} \approx 200$  °С.

Теплота пиролиза  $L$  зависит от вида горючего материала (см. прил. 5). Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза  $L_{\text{экз}}$  присутствует при горении древесины и содержащих ее композиционных материалов. В расчетах  $L_{\text{экз}}$  приближенно можно принимать равным 6 % от низшей теплоты сгорания.

В результате для ТГМ снижение температуры горения до температуры потухания без охлаждения прогретого слоя является условием тушения необходимым, но недостаточным, поскольку прогретый слой конденсированной фазы (твердого вещества или расплава) способен в течение некоторого времени поставлять нагретые продукты разложения и испарения в зону горения и являться источником их воспламенения. Поэтому при их тушении рассматривают еще одно достаточное условие – снижение температуры прогретого слоя до температуры начала пиролиза или плавления.

Наиболее эффективным способом тушения ТГМ любого типа является принудительное охлаждение непосредственно поверхности горения. Время прекращения горения определяется интенсивностью теплоотвода от поверхности и термическим сопротивлением прогретого слоя.

Условие тушения ТГМ выполняется, если огнетушащее вещество подается на поверхность горения с такой интенсивностью, что за время тушения отбирает тепло, поступающее к поверхности, а также тепло, запасенное в прогретом слое за время горения:

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{треб}} = Q_{\text{пов}} + Q_{\text{зап}}, \quad (4.14)$$

где  $Q_{\text{отв}}$  – тепло, отводимое огнетушащим веществом от 1 м<sup>2</sup> поверхности, кДж/м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{пов}}$  – тепло, поступающее к поверхности, кДж/м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{зап}}$  – удельное теплосодержание прогретого слоя, кДж/м<sup>2</sup>.

Здесь

$$Q_{\text{пов}} = q_{\text{луч}} \tau_{\text{т}}, \quad (4.15)$$

где  $q_{\text{луч}}$  – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения, кВт/м<sup>2</sup>;  $\tau_{\text{т}}$  – время тушения, с.

Если подаваемое огнетушащее вещество поступает к поверхности без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность, количество тепла, отбираемое за время  $\tau_{\text{т}}$  от 1 м<sup>2</sup> поверхности горения  $Q_{\text{отв}}$ , будет равно

$$Q_{\text{отв}} = J Q_{\text{охл}} \tau_{\text{т}}, \quad (4.16)$$

где  $J$  – интенсивность подачи, л/(м<sup>2</sup>·с) или кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\tau_{\text{т}}$  – время подачи огнетушащего вещества, с.

Отсюда теоретическое, минимально возможное, время тушения по механизму отвода тепла от поверхности  $\tau_T$ , с, равно

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} . \quad (4.17)$$

При  $J = q_{\text{вн}}/Q_{\text{охл}}$ , т. е. когда подача огнетушащего вещества на поверхность компенсирует только внешние тепловые потоки,  $\tau_T \rightarrow \infty$ . Такая интенсивность подачи является критической  $J_{\text{кр}}$ .

При  $J \rightarrow \infty$  время тушения  $\tau_T \rightarrow 0$ . Однако минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего прогретого слоя  $\tau_0$ . Это физическое время определяется термическим сопротивлением материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20 с.

Таким образом, теоретическое время прекращения горения при тушении по поверхности определяется по формуле

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 . \quad (4.18)$$

Охлаждающий эффект огнетушащего вещества зависит от его агрегатного состояния, теплоты фазового перехода, теплоемкости, способа тушения.

Умножив обе части формулы (4.18) на  $J$ , получим выражение для удельного расхода:

$$q_{\text{уд}} \geq \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} J + \tau_0 J. \quad (4.19)$$

Оптимальная интенсивность подачи, при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества (см. рис. 4.1), находится дифференцированием уравнения (4.19) по  $J$ , л/(м<sup>2</sup>·с). Приравняв первую производную  $dq_{\text{уд}}/dJ$  к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи:

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left( \sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right). \quad (4.20)$$

## Огнетушащие вещества

В настоящее время все огнетушащие вещества принято разделять на группы:

- вода и водные растворы;
- пены;
- газовые огнетушащие составы;
- порошковые огнетушащие составы;
- аэрозолеобразующие огнетушащие составы.

Вода и водные растворы являются огнетушащими веществами преимущественно охлаждающего действия. С помощью воды прекращение горения достигают, охлаждая как зону горения, так и горящий материал. Кроме того, водяной пар оказывает дополнительное разбавляющее действие. В результате температура пламени достигает температуры потухания.

Водные растворы содержат различные добавки, снижающие поверхностное натяжение (пенообразователи, смачиватели), уменьшающие или, наоборот, увеличивающие вязкость воды и др. Содержание этих веществ в рабочих растворах, как правило, не превышает 4 % и их влияние на теплофизические свойства воды можно не учитывать.

Значения основных теплофизических параметров воды, используемые при расчетах, приведены ниже:

- температура кипения  $T_{\text{кип}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;
- удельная теплоемкость  $c = 4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  в интервале  $0\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- теплота парообразования  $r = 2260 \text{ кДж/кг}$ ;
- средняя удельная теплоёмкость водяного пара –  $c_p^{\text{пара}} = 2,30 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  в интервале  $100\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Теоретический охлаждающий эффект воды  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/л:*

при объёмном тушении

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_p^{\text{пара}}(T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}), \quad (4.21)$$

при тушении по поверхности

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r, \quad (4.22)$$

где  $T_{\text{пот}}$  – температура потухания,  $^\circ\text{C}$ .

При тушении по поверхности водой, имеющей  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_{\text{охл}} = 4,20(100 - 20) + 2260 = 2596 \text{ кДж/л}$ . В расчетах принимается  $Q_{\text{охл}} = 2600 \text{ кДж/л}$ .

*Разбавляющий эффект воды* заключается в том, что при полном ее испарении из 1 л образуется 1720 л пара, который является огнетушащим веществом.

Пены относятся к веществам преимущественно изолирующего действия. Соотношение изолирующей и охлаждающей способности пен зависит от их кратности, а также от природы поверхностно-активного вещества, на основе которого получен пенообразователь. Кратность  $K_{\text{пены}}$  – отношение объема пены к объему ее жидкой фазы. По этому показателю пены делятся на низкократные –  $K = 4 - 20$ , средnekратные –  $K = 21 - 200$  и высокократные –  $K$  более 200. Системы с кратностью менее 4 относятся к пеноэмульсиям. При прочих равных условиях, чем выше кратность пены, тем больше изолирующая способность и меньше охлаждающая.

При тушении пеной твердых горючих материалов главным является процесс охлаждения. При этом слой пены, нанесенный на поверхность горючего материала, экранирует внешний лучистый тепловой поток, который падает от непотушенных участков, соседних горящих поверхностей и т. п. Постепенно разрушаясь, пена выделяет раствор пенообразователя, который пропитывает горючий материал и понижает его температуру. Поскольку раствор пенообразователя имеет меньшее поверхностное натяжение, чем вода, он обладает большей впитывающей способностью.

Процесс прекращения горения жидкости пеной можно условно разделить на две стадии: растекание пены по зеркалу жидкости и накапливание изолирующего слоя. На обеих стадиях происходит разрушение пены под действием различных факторов. Накопление пены на поверхности горючего может начаться, если интенсивность ее подачи больше интенсивности разрушения. Необходимо помнить, что интенсивность подачи  $J$  всегда задается в л/(м<sup>2</sup>·с) по пенообразующему раствору. Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется *критической*  $J_{\text{кр}}$ .

Очевидно, что объем слоя пены, накопленного за время тушения, равен разности объемов пены, поданной и разрушенной. Соответственно интенсивность накопления пены  $J_{\text{нак}}$  равна  $J - J_{\text{кр}}$ . Отсюда критическая интенсивность подачи раствора равна

$$J_{\text{кр}} = J - J_{\text{нак}}. \quad (4.23)$$

Если известен объем пены  $V_{\text{нак}}$ , накопленный за время тушения, величину  $J_{\text{нак}}$  можно вычислить по формуле

$$J_{\text{нак}} = \frac{V_{\text{нак}} 10^3}{\tau S_p K_{\text{пены}}} = \frac{HS_p 10^3}{\tau S_p K_{\text{пены}}} = \frac{H 10^3}{K_{\text{пены}}}, \quad (4.24)$$

где  $H$  – толщина накопленного слоя пены, м;  $S_p$  – площадь зеркала жидкости (резервуара), м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время подачи пены, с;  $K_{\text{пены}}$  – кратность пены; коэффициент  $10^3$  необходим для перевода кубических метров в литры.

Оптимальной является интенсивность подачи  $J_{\text{опт}}$ , при которой удельный расход  $q_{\text{уд}}$  раствора пенообразователя минимален. Зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$\tau_{\text{т}} = B \frac{J + J_{\text{кр}}}{J - J_{\text{кр}}}, \quad (4.25)$$

где  $B$  – коэффициент, зависящий от вида пенообразователя и параметров пены, имеющий размерность времени.

Так как  $q_{\text{уд}} = J\tau_{\text{т}}$ , можно записать:

$$q_{\text{уд}} = JB \frac{J + J_{\text{кр}}}{J - J_{\text{кр}}}. \quad (4.26)$$

Для определения  $J_{\text{опт}}$  строят график зависимости  $q_{\text{уд}} = f(J)$  и находят значение  $J$ , при котором  $q_{\text{уд}}$  минимален. Коэффициент  $B$  можно принять равным 1, так как он не влияет на координаты минимума.

Характеристикой изолирующей способности пены является высота тушащего слоя  $H_{\text{пены}}$ , м:

$$H_{\text{пены}} = 10^{-3}(J - J_{\text{кр}})K_{\text{пены}}\tau_{\text{т}}, \quad (4.27)$$

где  $J_{\text{кр}}$  – критическая интенсивность подачи, л/(м<sup>2</sup>·с);  $K_{\text{пены}}$  – кратность пены;  $10^{-3}$  – коэффициент перевода литров в кубические метры.

Газовые огнетушащие составы являются веществами преимущественно объемного действия. Они прекращают горение в газовой фазе. К этому классу огнетушащих веществ относятся нейтральные газы (диоксид углерода, азот, водяной пар, гелий, аргон) и химически-активные ингибиторы – хладоны. Их эффективность при тушении твердых горючих материалов, склонных к тлению, определяется теплоемкостью и способностью ингибировать горение на твердой поверхности.

При тушении пожаров в помещениях методом затопления пламенное горение прекращается, когда концентрация газового состава во всем объеме становится равной огнетушащей  $\varphi_{\text{огн}}$ . Материальный баланс процесса заполнения негерметичного помещения, в упрощенном виде, описывается следующим уравнением:

$$v_{\text{гос}} d\tau = V_{\text{пом}} da + v_{\text{пр}} a d\tau, \quad (4.28)$$

где  $v_{\text{гос}}$  – объемный расход газового огнетушащего состава, м<sup>3</sup>/с;  $v_{\text{пр}}$  – расход продуктов горения через проемы, щели и т.п., м<sup>3</sup>/с;  $V_{\text{пом}}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $a$  – текущее значение объемной доли газового состава,  $a = \varphi/100$ ;  $\tau$  – время, с.

Откуда после ряда преобразований получается зависимость времени тушения пламени в объеме помещения от расхода газового состава:

$$\tau_T = \frac{2V_{\text{пом}} a_{\text{огн}}}{2v_{\text{гос}} - v_{\text{пр}} a_{\text{огн}}}. \quad (4.29)$$

Здесь

$$v_{\text{пр}} = \frac{2}{3} \mu \frac{(S_{\text{пр}} - S_1)}{\rho_{\text{пр}}} \sqrt{2g(H_{\text{пр}} - h_0) \rho_{\text{пр}} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пр}})}, \quad (4.30)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проема ( $\mu \approx 0,65$ );  $H_{\text{пр}}$  – высота проема, м;  $h_0$  – высота плоскости равных давлений относительно нижней отметки проема, м;  $\rho_{\text{пр}}$  – плотность продуктов горения,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;  $S_{\text{пр}}$  – площадь проема,  $\text{м}^2$ ;  $S_1$  – площадь приточной части проема,  $\text{м}^2$  ( $S_1 = B_{\text{пр}} h_0$ , где  $B_{\text{пр}}$  – ширина проема, м).

Из формулы (4.29) следует, что критический расход газового состава, при котором  $\tau_T \rightarrow \infty$ , равен

$$v_{\text{гос}}^{\text{кр}} = \frac{1}{2} v_{\text{пр}} a_{\text{огн}}. \quad (4.31)$$

Массовый секундный расход газа  $g = v_{\text{гос}} \rho_{\text{гос}}$ , кг/с. Удельный расход газа  $q_{\text{уд}}$ ,  $\text{кг/м}^3$ , равен

$$q_{\text{уд}} = g \tau_T / V. \quad (4.32)$$

Для прекращения гетерогенного горения необходимо дополнительно охлаждать поверхность материала до температуры, как минимум, начала пиролиза. На что требуется дополнительное количество газа. Поэтому огнетушащая концентрация газового состава задается больше, чем при тушении нетлеющих материалов.

Огнетушащие концентрации газовых составов, используемые при расчете автоматических установок пожаротушения, даны в прил. 6.

Наибольшей охлаждающей способностью обладают газовые огнетушащие составы, выбрасываемые из подающего устройства в жидком или твердом состоянии.

*Диоксид углерода* при повышении давления при температурах от +31 до  $-57$  °С сжижается. Ниже  $-57$  °С он переходит в твердое состояние (сухой лед). При обратном переходе в газообразное состояние из 1 кг жидкого диоксида углерода образуется примерно 500 л газа. Теплота парообразования жидкого  $\text{CO}_2$  при 0 °С равна 235,1 кДж/кг.

Если выброс газообразного диоксида углерода происходит в режиме дросселирования, он переходит в твердое состояние и выбрасывается в виде хлопьев, похожих на снежные, с температурой  $-78,5$  °С. В очаге пожара

они превращаются в газ, минуя жидкую фазу. Такое же превращение испытывает твердый гранулированный диоксид углерода.

Теплота сублимации твердого диоксида углерода 574,0 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газообразного  $\text{CO}_2$  в интервале 0–1000 °С составляет 1,99 кДж/(м<sup>3</sup>·К) или 1,47 кДж/(кг·К).

*Теоретический охлаждающий эффект диоксида углерода  $Q_{\text{охл}}$ , кДж/кг:*

– твердого при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (4.33)$$

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

– твердого при охлаждении прогретого слоя жидкости:

$$Q_{\text{охл}} = r + c_p(T_{\text{кип}} - T_0), \quad (4.34)$$

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

– газообразного при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = c_p(T_{\text{пот}} - T_0), \quad (4.35)$$

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

*Азот* сжижается при  $-196$  °С. При обратном переходе 1 л жидкого азота, испаряясь и нагреваясь до 20 °С, образует 250 л газа. Удельная теплота парообразования жидкого азота при температуре кипения – 199 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газообразного азота 1,05 кДж/(кг·К) в интервале 0–100 °С.

Порошковые огнетушащие составы (ПОС) по основному назначению делятся на классы: АВС, ВС, ABCD и D. Порошковые составы классов АВС и ABCD являются огнетушащими веществами объемно-поверхностного действия, ВС – преимущественно объемного, D – поверхностного действия (порошки целевого назначения, предназначены для тушения металлов, металлоорганических соединений). Все ПОС способны прекращать горение электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В.

ПОС класса АВС при нагреве до температуры порядка 120 °С начинают плавиться с поглощением тепла. Кроме того, на тлеющей поверхности они образуют вязкую полимерную пленку плава, затрудняющую доступ кислорода. Экспериментальный охлаждающий эффект  $Q_{\text{охл}}$  порошков данного класса на основе диаммонийфосфата при нагреве до 600–800 °С

(что примерно соответствует температуре поверхности древесины при горении) составляет 1769–2000 кДж/кг. На практике показателем огнетушащей способности порошков класса ABC является удельный расход, кг/м<sup>2</sup>, порошка на тушение модельного очага класса А (штабеля из брусков древесины).

ПОС класса ВС на горячей поверхности твердых материалов практически не удерживаются, изолирующего и охлаждающего действия не оказывают. Показателем огнетушащей способности порошков класса ВС является удельный расход, кг/м<sup>2</sup>, порошка на тушение модельного очага класса В (противня с горючей жидкостью).

Аэрозолеобразующие огнетушащие составы (АОС) относятся к веществам объемного действия. Они представляют собой твердотопливные композиции. Огнетушащий состав образуется в результате их сжигания. Продуктом горения является сложная многокомпонентная смесь, состоящая из газовой фазы, включающей диоксид углерода, азота, и конденсированной фазы, состоящей из мельчайших, размером около 1 мкм, твердых частиц. Огнетушащая способность аэрозолей в несколько раз выше, чем у газовых огнетушащих составов – как нейтральных газов, так и хладонов. Она характеризуется величиной минимального тушащего удельного расхода, кг/м<sup>3</sup>.

Для расчета параметров тушения используют следующие основные формулы.

*Интенсивность подачи J, л/(м<sup>2</sup>·с), кг/(м<sup>2</sup>·с):*

$$J = \frac{g_{\text{ов}}}{S_{\text{п}}}, \quad (4.36)$$

где  $g_{\text{ов}}$  – секундный расход огнетушащего вещества, л/с, кг/с;  $S_{\text{п}}$  – площадь пожара, м<sup>2</sup>.

*Удельный расход  $q_{\text{уд}}$ , л/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, л/м<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>:*

– при тушении по поверхности

$$q_{\text{уд}} = J\tau_{\text{т}} = \frac{g_{\text{ов}}}{S_{\text{п}}}\tau_{\text{т}}; \quad (4.37)$$

– при объемном тушении

$$q_{\text{уд}} = \frac{g_{\text{ов}}}{V_{\text{пом}}}\tau_{\text{т}}, \quad (4.38)$$

где  $V_{\text{пом}}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

*Теоретический удельный расход  $q_{\text{уд}}^0$ , л/м<sup>3</sup>, л/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>3</sup>:*

$$q_{уд}^0 = \frac{Q^{тр\acute{e}б}}{Q_{охл}}, \quad (4.39)$$

где  $Q^{тр\acute{e}б}$  – количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения или поверхности материала для снижения температуры пламени до температуры потухания, кДж/м<sup>3</sup>, кДж/м<sup>2</sup>;  $Q_{охл}$  – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>.

*Теоретическая интенсивность подачи  $J^0$  при тушении пламени над поверхностью, л/(м<sup>2</sup>·с), кг/(м<sup>2</sup>·с):*

$$J^0 = \frac{q_{отв}^{тр\acute{e}б}}{Q_{охл}}, \quad (4.40)$$

где  $q_{отв}^{тр\acute{e}б}$  – удельная интенсивность теплоотвода от пламени, требуемая для его охлаждения до температуры потухания, кВт/м<sup>2</sup>;  $Q_{охл}$  – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг.

Требуемую интенсивность теплоотвода можно приближенно оценить по формуле

$$q_{отв}^{тр\acute{e}б} = (1 - f)kq'_{п}, \quad (4.41)$$

где  $f$  – коэффициент теплопотерь излучением;  $k$  – коэффициент снижения температуры пламени до температуры потухания;  $q'_{п}$  – приведенная теплота пожара,  $q'_{п} = \beta v_m^{пр} Q_{н}$ , кВт/м<sup>2</sup>.

Для жидкостей  $f \approx 0,3$ ;  $k \approx 0,28$ . Для твердых материалов  $f \approx 0,4$ ;  $k \approx 0,22$ .

*Показатель эффективности тушения  $\Pi_{эт}$ :*

$$\Pi_{эт} = \frac{1}{J \tau_t^2} = \frac{1}{q_{уд} \tau}. \quad (4.42)$$

*Коэффициент использования огнетушащего вещества  $K_{и}$ :*

– теоретический

$$K_{и}^0 = \frac{q_{уд}^0}{q_{уд}}, \quad (4.43)$$

где  $q_{уд}^0$  – теоретический удельный расход, л/м<sup>2</sup>;  $q_{уд}$  – фактический удельный расход, л/м<sup>2</sup>;

– практический

$$K_{и} = \frac{q_{уд}^{\min}}{q_{уд}}, \quad (4.44)$$

где  $q_{уд}^{\min}$  – минимальный при данной площади пожара удельный расход огнетушащего вещества, полученный при тушении реальных пожаров, л/м<sup>2</sup>.

При тушении ординарных пожаров водой [4]:

$$\lg q_{уд}^{\min} = 1,1 \lg S_{п} + 0,302. \quad (4.45)$$

При  $S_{п} \geq 40 \text{ м}^2$   $q_{уд}^{\min} = 0,5 S_{п}. \quad (4.46)$

Табличные данные, необходимые для решения задач, приведены в приложениях 1 – 6.

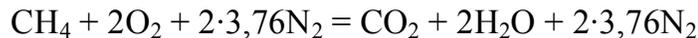
### Примеры решения задач

Пример 1.

Рассчитать температуру потухания метана в воздухе, если эффективная энергия активации химической реакции горения равна 160 кДж/моль.

Решение.

Для оценки температуры потухания по формуле (4.5) необходимо предварительно рассчитать адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси метана в воздухе по методике, изложенной в работах [1; 2]:



Теоретический объём воздуха, необходимый для сгорания 1 кмоль метана, составит:

$$V_{в}^0 = 2 + 2 \cdot 3,76 = 9,52 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Теоретический объём продуктов горения

$$V_{п}^0 = 1 + 2 + 2 \cdot 3,76 = 10,52 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Низшая теплота сгорания метана определяется по закону Гесса [1; 2]:

$$Q_{н} = V_{\text{CO}_2} H_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} H_{\text{H}_2\text{O}} - H_{\text{CH}_4}.$$

Значения  $H_{\text{CO}_2}$ ,  $H_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $H_{\text{CH}_4}$  определяются из табл. 4 прил. 3.

$$Q_{н} = 396,6 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 806 \text{ кДж/моль.}$$

Среднее теплосодержание продуктов горения составит:

$$H_{ср} = Q_{н} / V_{п}^0 = 806 / 10,52 = 76,6 \text{ кДж/моль.}$$

Так как в продуктах горения наибольшее содержание азота, в качестве первого приближения  $T_1$  по табл. 2 прил. 3 выбираем температуру 2100 °С и рассчитываем их теплосодержание  $Q_1$ .

Для  $T_1 = 2100^\circ\text{C}$ :

$$Q_1 = 114,7 \cdot 1 + 93,4 \cdot 2 + 70,4 \cdot 7,52 = 830,9 \text{ кДж/моль.}$$

Так как  $Q_1 > Q_n$ , находим теплосодержание продуктов горения при более низкой температуре – 2000 °С.

Для  $T_2 = 2000$  °С:

$$Q_2 = 108,6 \cdot 1 + 88,1 \cdot 2 + 66,8 \cdot 7,52 = 787,1 \text{ кДж/моль.}$$

Так как  $Q_2 < Q_1$ , определяем адиабатическую температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{\Gamma}^0 = 2000 + \frac{(806 - 787,1)(2100 - 2000)}{830,9 - 787,1} = 2043 \text{ °С} = 2316 \text{ К.}$$

Температура потухания равна

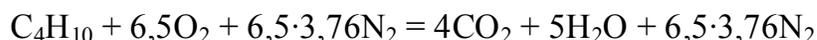
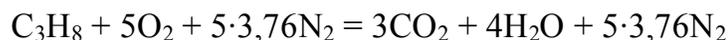
$$T_{\text{пот}}^0 = T_{\Gamma}^0 \left(1 - \frac{3RT_{\Gamma}^0}{E}\right) = 2316 \left(1 - \frac{3 \cdot 8,31 \cdot 2316}{160 \cdot 10^3}\right) = 1480 \text{ К} = 1207 \text{ °С.}$$

Пример 2.

Рассчитать температуру потухания в воздухе пропан-бутановой смеси, если мольные доли пропана и бутана в смеси составляют 0,6 и 0,4 соответственно, НКПР пропана – 2,3 % (об.), бутана – 1,8 % (об.), низшая теплота сгорания пропана – 2044 кДж/моль, бутана – 2657 кДж/моль.

Решение.

Для определения температуры потухания следует рассчитать объём воздуха, необходимого для горения пропан-бутановой смеси и объём продуктов горения, по методике, рассмотренной в учебном пособии [2]:



Теоретический объём воздуха составит:

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{г}i} n_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21} = \frac{60 \cdot 5 + 40 \cdot 6,5 - 0}{21} = 26,6 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где  $\varphi_{\text{г}i}$  – содержание  $i$ -го горючего газа в смеси, % (об.);  $n_i$  – коэффициент при кислороде в уравнении реакции;  $\varphi_{\text{O}_2}$  – содержание кислорода в составе смеси, % (об.).

Для удобства расчёта теоретического объёма продуктов горения составим табл. 4.1.

Таблица 4.1

## Расчетный состав продуктов горения

Компонент смеси	Содержание компонента в 1 м <sup>3</sup> смеси, м <sup>3</sup>	Объем продуктов горения, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		
		СО <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> О	N <sub>2</sub>
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,6	0,6·3	0,6·4	0,6·5·3,76
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,4	0,4·4	0,4·5	0,4·6,5·3,76
Итого	1	3,4	4,4	21,06

Теоретический объем продуктов горения  $V_{\text{пр}}^0$  равен

$$V_{\text{пр}}^0 = 3,4 + 4,4 + 21,06 = 28,86 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Нижний концентрационный предел распространения пламени для смеси газов определяется по формуле Ле Шателье:

$$\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} = \frac{1}{\sum \frac{\mu_i}{\varphi_{\text{ни}}}} = \frac{1}{\frac{0,6}{2,3} + \frac{0,4}{1,8}} = 2,07\% \text{ (об.)},$$

где  $\mu_i$  – мольная доля  $i$ -го горючего;  $\varphi_{\text{ни}}$  – НКПР  $i$ -го горючего, % (об.).

Коэффициент избытка воздуха на НКПР равен

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{н}}^{\text{см}}}{\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} V_{\text{в}}^0} = \frac{100 - 2,07}{2,07 \cdot 26,6} = 1,8.$$

Избыток воздуха  $\Delta V_{\text{в}}$  составит:

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1) = 26,6(1,8 - 1) = 21,28 \text{ м}^3.$$

Низшая теплота сгорания смеси газов

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^{\text{см}} &= 0,01 \sum \varphi_{\text{ги}} Q_{\text{ни}} = \\ &= 0,6 \cdot 2044 + 0,4 \cdot 2657 = 2289,2 \text{ кДж/моль} = 102196 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Среднее теплосодержание продуктов горения газовой смеси составит:

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}}} = \frac{102196}{28,86 + 21,28} = 2038,2 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как большую часть объема продуктов горения составляет азот, температура смеси должна быть около 1400 °С (при данной температуре теплосодержание азота равно 2010 кДж/м<sup>3</sup>). Выбираем 1400 °С в качестве первого приближения. По табл. 2 прил. 3 находим:

при  $T_1 = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_1 = 2010 \cdot 21,06 + 3210 \cdot 3,4 + 2560 \cdot 4,4 + 2040 \cdot 21,2 = 107919,8 \text{ кДж/м}^3;$$

при  $T_2 = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_2 = 1860 \cdot 21,06 + 2980 \cdot 3,4 + 2350 \cdot 4,4 + 1880 \cdot 21,28 = 99650 \text{ кДж/м}^3.$$

Методом линейной интерполяции определяем адиабатическую температуру потухания:

$$T_{\text{пот}}^0 = 1300 + \frac{(102196 - 99650)(1400 - 1300)}{107919,8 - 99650} = 1330 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Пример 3.

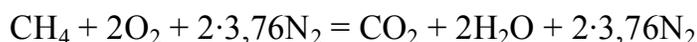
Рассчитать теоретический удельный расход воды,  $\text{л/м}^2$ , при тушении газового фонтана (метан) дебитом 3 млн  $\text{м}^3/\text{сут}$ , если адиабатическая температура горения газа –  $2010 \text{ }^\circ\text{C}$ , адиабатическая температура потухания –  $990 \text{ }^\circ\text{C}$ . Удельная теплоемкость воды  $4,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; водяного пара –  $2,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; теплота парообразования воды –  $2260 \text{ кДж/кг}$ .

Решение.

Для случая тушения газа теоретический удельный расход воды составит:

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{Q^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}}.$$

Для оценки  $Q^{\text{треб}}$  необходимо определить объём продуктов горения метана. Составляем уравнение химической реакции горения:



Используя табл. 2 прил. 3, определяем теплосодержание продуктов горения при температурах, близких к температуре горения  $T_r$  ( $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и температуре потухания  $T_{\text{пот}}$  ( $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), и заносим эти данные в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Теплосодержание зоны горения

№ п/п	Продукты горения		Теплосодержание зоны горения, $\text{кДж/м}^3$	
	Состав	Объём, $\text{м}^3/\text{м}^3$	при $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $\sim T_r$ )	при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ( $\sim T_{\text{пот}}$ )
1	$\text{CO}_2$	1	4850	2210
2	$\text{H}_2\text{O}$	2	3930	1720
3	$\text{N}_2$	$2 \cdot 3,76$	2980	1400

По формуле (4.1), исходя из данных табл. 4.2, находим требуемый теплоотвод:

$$Q^{\text{треб}} = 1(4850 - 2210) + 2(3930 - 1720) + 2 \cdot 3,76(2980 - 1400) = 8941 \text{ кДж/м}^3.$$

По формуле (4.13) определяем охлаждающий эффект воды при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = 4,2(100 - 20) + 2260 + 2,2(990 - 100) = 4554 \text{ кДж/л.}$$

Теоретический удельный расход воды составит:

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{18941}{4554} = 4,15 \text{ л/м}^3.$$

Пример 4.

Определить критическую интенсивность подачи тонкораспыленной воды при тушении керосина «по поверхности», если керосин имеет следующие характеристики: удельная теплоемкость – 2,1 кДж/(кг·К), удельная теплота парообразования – 2200 кДж/кг, удельная массовая скорость выгорания – 0,048 кг/(м<sup>2</sup>·с), температура кипения – 190 °С, температура вспышки – 53 °С.

Решение.

Согласно формулам (4.9) и (4.20):

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_{\text{м}}^{\text{уд}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{[2,1(190 - 53) + 2200]0,048}{2600} = 0,046 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Пример 5.

Найти фактическую интенсивность подачи и удельный расход воды, если на тушение пожара площадью 40 м<sup>2</sup> было подано 2 ручных ствола с расходом  $g_{\text{ств}} = 3,5$  л/с, время тушения 8 мин.

Решение.

Суммарный секундный расход воды составляет:

$$g = \sum g_{\text{ств}} = 2 \cdot 3,5 = 7 \text{ л/с.}$$

Фактическая интенсивность подачи равна

$$J = \frac{g}{S_{\text{п}}} = \frac{7}{40} = 0,175 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Удельный расход воды за все время тушения составил:

$$q_{\text{уд}} = J\tau_{\text{т}} = 0,175 \cdot 8 \cdot 60 = 84 \text{ л/м}^2.$$

Пример 6.

Рассчитать требуемый секундный расход воды и количество ручных стволов на тушение пожара площадью  $120 \text{ м}^2$ , если требуемая для тушения интенсивность подачи составляет  $0,1 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Решение.

Требуемый секундный расход определяется по формуле

$$g = JS_{\Pi} = 0,1 \cdot 120 = 12 \text{ л/с.}$$

При подаче стволов с расходом  $g_{\text{ств}} = 7 \text{ л/с}$  требуемое их количество  $N_{\text{ств}}$  составит:

$$N_{\text{ств}} = \frac{g}{g_{\text{ств}}} = \frac{12}{7} \approx 2.$$

При подаче стволов с расходом  $g_{\text{ств}} = 3,5 \text{ л/с}$

$$N_{\text{ств}} = \frac{g}{g_{\text{ств}}} = \frac{12}{3,5} \approx 4.$$

Пример 7.

Найти теоретический коэффициент использования огнетушащего порошка при тушении пламени над поверхностью ТГМ на площади  $7 \text{ м}^2$ , если пожар был потушен за  $10 \text{ с}$  двумя ручными огнетушителями с расходом  $0,45 \text{ кг/с}$  порошка каждый. Количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения, составляет  $1200 \text{ кВт/м}^2$ . Охлаждающий эффект порошка  $1500 \text{ кДж/кг}$ .

Решение.

Коэффициент использования огнетушащего вещества определяется из соотношения теоретического и фактического удельного расхода:

$$K_{\text{и}} = \frac{q_{\text{уд}}^0}{q_{\text{уд}}^{\text{ф}}}.$$

Теоретический удельный расход можно определить по формуле

$$q_{\text{уд}}^0 = \frac{Q^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{1200}{1500} = 0,8 \text{ кг/м}^2.$$

Фактический удельный расход составит:

$$q_{\text{уд}}^{\text{ф}} = \frac{g_{\text{огн}} N_{\text{огн}} \tau_{\text{т}}}{S_{\Pi}} = \frac{0,45 \cdot 2 \cdot 10}{7} = 1,3 \text{ кг/м}^2.$$

Коэффициент использования составляет:

$$K_{и} = \frac{0,8}{1,3} = 0,62.$$

Пример 8.

Найти коэффициент использования воды, если для тушения пожара на площади  $50 \text{ м}^2$  было подано 2 ручных ствола с расходом  $3,5 \text{ л/с}$  каждый. Время тушения  $16 \text{ мин}$ .

Решение.

Фактический удельный расход воды составляет:

$$q_{уд} = \frac{g_{ств} N_{ств} \tau_{т}}{S_{п}} = \frac{3,5 \cdot 2 \cdot 16 \cdot 60}{50} = 134,4 \text{ л/м}^2.$$

Минимальный удельный расход

$$q_{уд}^{\text{мин}} = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ л/м}^2.$$

Коэффициент использования равен

$$K_{и} = \frac{25}{134,4} = 0,19.$$

Пример 9. Сравнить эффективность двух способов тушения пожара № 1 и № 2 в жилом помещении по следующим результатам.

	№ 1	№ 2
Площадь пожара.....	20	20
Огнетушащие вещества.....	Порошок+водопенный раствор	Вода
Средства тушения.....	Переносные огнетушители	Ручные стволы
Время тушения, включая разработку, проливку, с.....	292	300
Затраты огнетушащих веществ.....	16 кг порошка+35 л раствора	2200 л

Решение.

Для сравнительной оценки эффективности разных способов и средств тушения используется показатель  $\Pi_{эт}$  (4.42):

$$\Pi_{эт} = \frac{1}{J \tau_{т}^2} = \frac{1}{q_{уд} \tau}.$$

Удельные расходы огнетушащих веществ равны:

при способе тушения № 1 –  $q_{уд} = (16 + 35)/20 = 51/20 = 2,55 \text{ кг/м}^2$ ;  
 при способе тушения № 2 –  $q_{уд} = 2200/20 = 110 \text{ кг/м}^2$ .

Интенсивности подачи огнетушащих веществ равны:

при способе тушения № 1 –  $J = 51/(20 \cdot 292) = 0,0087 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

при способе тушения № 2 –  $J = 2200/(20 \cdot 300) = 0,37 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

$$\Pi_{\text{эт}}^1 = \frac{1}{2,55 \cdot 292} = 1,34 \cdot 10^{-3}; \quad \Pi_{\text{эт}}^2 = \frac{1}{110 \cdot 300} = 3 \cdot 10^{-5}.$$

Вывод. Способ тушения № 1 более эффективен, чем способ № 2.

Пример 10.

Сравнить эффективность тушения поверхности горячей древесины водой и жидким азотом при одинаковой интенсивности подачи  $J = 0,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , если время свободного горения  $\tau_{\text{гор}} = 600 \text{ с}$ , минимальное время охлаждения прогретого слоя  $\tau_{\text{мин}} = 20 \text{ с}$ , приведенная массовая скорость выгорания  $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 0,0065 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , внешний падающий тепловой поток  $q_{\text{вн}} = 30 \text{ кВт}/\text{м}^2$ . Удельную теплоту пиролиза принять равной  $2790 \text{ кДж}/\text{кг}$ , низшую теплоту сгорания –  $13800 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Решение.

При одинаковой интенсивности подачи сравнить эффективность тушения можно по значению теоретического времени прекращения горения. Для расчета  $\tau_{\text{т}}$  по формуле (4.18) необходимо определить параметры горения материала  $q_{\text{конв}}$  (см. формулу (4.13)) и  $Q_{\text{зап}}$  (см. формулу (4.12)):

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) = 0,0065 \cdot 3,7 (700 - 200) = 12,0 \text{ кВт}/\text{м}^2;$$

$$L_{\text{пир}} = 0,06 Q_{\text{н}} = 0,06 \cdot 13800 = 828 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}} (L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}} = [30 - 0,0065 (2790 - 828) - 12] 600 = \\ = 3148,2 \text{ кДж}/\text{м}^2.$$

При заданной интенсивности подачи теоретическое время тушения водой составит:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{3148,2}{0,2 \cdot 2600 - 30} + 20 = 26,0 \text{ с}.$$

Теоретическое время тушения жидким азотом равно

$$\tau_{\text{т}} = \frac{3148,2}{0,2 \cdot 199 - 30} + 20 = 341,0 \text{ с}.$$

Пример 11.

Рассчитать теоретическую интенсивность подачи и требуемый секундный расход огнетушащего порошка марки «Пирант-А» при тушении поверхности кабельной изоляции из полиэтилена на площади  $14 \text{ м}^2$ . Время свободного горения 8 мин. Массовая удельная скорость выгорания равна

0,02 кг/(м<sup>2</sup>·с). Коэффициент поверхности горения  $K_{\Pi} = 12,5$ . Температура поверхности 600 °С, температура воспламенения полиэтилена – 300 °С. Плотность расплава полиэтилена 760 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $0,21 \cdot 10^{-3}$  кВт/(м·К). Охлаждающий эффект данного порошка 1770 кДж/кг.

Решение.

Для прекращения горения изоляции требуется понизить температуру ее поверхности с  $T_{\text{пов}}$  до температуры воспламенения  $T_{\text{впл}}$ . Так как порошковое облако практически мгновенно ликвидирует собственное пламя и экранирует внешнее излучение, можно считать, что интенсивность теплоотвода  $q^{\text{треб}}$ , должна быть равна тепловому потоку  $q_{\text{зап}}$ , кВт/м<sup>2</sup>, аккумулируемому расплавленным слоем изоляции:

$$q^{\text{треб}} = q_{\text{зап}} = Q_{\text{зап}}/\tau_{\text{гор}}$$

На практике интенсивность подачи определяется в расчете на площадь пожара. Поэтому, для расчета  $Q_{\text{зап}}$  (по формуле 4.7) удельную массовую скорость выгорания следует перевести в приведенную:

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = v_{\text{м}}^{\text{уд}}/K_{\Pi} = 0,02 / 12,5 = 0,0016 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

По формуле (4.7) находим

$$\begin{aligned} q^{\text{треб}} = Q_{\text{зап}} &= \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{пр}} \tau_{\text{гор}}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{впл}}) = \\ &= \frac{0,21 \cdot 10^{-3} \cdot 760}{0,0016 \cdot 8 \cdot 60} (600 - 300) = 62,3 \text{ кВт}/\text{м}^2. \end{aligned}$$

Принимая, что суммарный удельный теплоотвод порошком составляет 1770 кДж/кг, получаем требуемую расчетную интенсивность подачи:

$$J_{\text{тр}} = q^{\text{треб}} K_{\Pi} / Q_{\text{охл}} = 62,3 \cdot 12,5 / 1770 = 0,437 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Требуемый секундный расход порошка составит:

$$g_{\text{тр}} = J_{\text{тр}} S_{\Pi} = 0,437 \cdot 14 = 6,12 \text{ кг}/\text{с}.$$

Пример 12.

Рассчитать теоретическую оптимальную интенсивность подачи и удельный расход воды для тушения поверхности горящей древесины, если приведенная массовая скорость выгорания  $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 0,0085$  кг/(м<sup>2</sup>·с), внешний падающий тепловой поток  $q_{\text{вн}} = 40$  кВт/м<sup>2</sup>, время свободного горения 600 с. Удельную теплоту пиролиза  $L$  принять равной 2800 кДж/кг, низшую теплоту сгорания – 14200 кДж/кг. Теоретический охлаждающий эффект воды – 2600 кДж/кг.

Решение.

Для прекращения горения древесины требуется понизить температуру ее поверхности с  $T_{\text{пов}}$  до температуры начала активного пиролиза  $T_{\text{пир}}$ . Оптимальная интенсивность подачи  $J_{\text{опт}}$ , л/(м<sup>2</sup>·с), рассчитывается по формуле (4.20):

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left( \sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right);$$

Значение  $Q_{\text{зап}}$ , кДж/м<sup>2</sup>, находится по выражению (4.12) с использованием формулы (4.13):

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}},$$

$$L_{\text{экз}} = 0,06 Q_{\text{н}};$$

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}).$$

Подставив исходные данные, получим:

$$q_{\text{конв}} = 0,0085 \cdot 3,7(700 - 200) = 15,7 \text{ кВт/м}^2;$$

$$L_{\text{экз}} = 0,06 \cdot 14200 = 852 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{зап}} = [40 - 0,0085(2800 - 852) - 15,7] 600 = 4645 \text{ кДж/м}^2.$$

Отсюда оптимальная интенсивность подачи

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{2600} \left( \sqrt{\frac{4645 \cdot 40}{20}} + 40 \right) = 0,052 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Удельный расход огнетушащего вещества равен интенсивности подачи, умноженной на  $\tau_{\text{т}}$ . Время тушения  $\tau_{\text{т}}$  находим по формуле (4.18):

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{4645}{0,052 \cdot 2600 - 40} + 20 \approx 69 \text{ с}.$$

Определяем удельный расход воды (в расчете на площадь горения) при оптимальной интенсивности подачи:

$$q_{\text{уд}} = 0,052 \cdot 69 \approx 3,6 \text{ л/м}^2.$$

Пример 13.

Определить теоретическое время тушения и удельный расход воды, подаваемой с интенсивностью 0,2 л/(м<sup>2</sup>·с) для тушения штабеля древесины при следующих исходных данных.

Коэффициент поверхности  $K_{\text{п}} = 5$ . Время свободного горения 5 мин. Внешний тепловой поток к горячей поверхности 50 кВт/м<sup>2</sup>. Удельная массовая скорость выгорания 0,014 кг/(м<sup>2</sup>·с). Температурный интервал пиролиза древесины 200–700 °С, время охлаждения прогретого слоя  $\tau_0 = 20$  с.

Решение.

1. При определении теоретического времени тушения параметры подачи огнетушащего вещества и горения материала задаются в расчете на  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности горения. Поэтому удельную массовую скорость выгорания следует перевести в приведенную, а интенсивность подачи воды привести к площади поверхности горения, разделив их значения на  $K_{\text{п}}$ :

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = v_{\text{м}}^{\text{уд}}/K_{\text{п}} = 0,014/5 = 0,0028 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$
$$J = 0,2/5 = 0,04 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

2. Запас тепла, аккумулированный прогретым слоем за время свободного горения, равен (формула (4.7))

$$Q_{\text{зап}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) \tau_{\text{гор}} = 0,0028 \cdot 1,47 (700 - 200) 300 = 617,4 \text{ кДж}/\text{м}^2.$$

3. Теоретический охлаждающий эффект воды при тушении «по поверхности»  $Q_{\text{охл}} = 2600 \text{ кДж}/\text{л}$  (формула (4.14)). Время тушения при данной интенсивности подачи равно (формула (4.12))

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{617,4}{0,04 \cdot 2600 - 50} + 20 = 31,4 \approx 32 \text{ с}.$$

Теоретический удельный расход в расчете на  $1 \text{ м}^2$  площади пожара равен

$$q_{\text{уд}}^0 = J\tau_{\text{т}}K_{\text{п}} = 0,04 \cdot 32 \cdot 5 = 6,4 \text{ л}/\text{м}^2.$$

Пример 14.

Определить критическую и оптимальную интенсивности подачи раствора пенообразователя по результатам опыта. Пена подавалась в течение 30 с двумя ГПС-200. Площадь резервуара  $30 \text{ м}^2$ . Толщина слоя пены после тушения составила 0,3 м.

Решение.

1. Находим интенсивность подачи раствора:

$$J = gn/S_{\text{р}} = 2 \cdot 2/30 = 0,12 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}),$$

где  $g$  – производительность пеногенератора по раствору, л/с;  $n$  – число пеногенераторов;  $S_{\text{р}}$  – площадь резервуара,  $\text{м}^2$ .

2. Принимая  $K_{\text{пены}} = 100$ , определяем интенсивность накопления пены:

$$J_{\text{нак}} = \frac{0,3 \cdot 10^3}{30 \cdot 100} = 0,10 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

3. Находим критическую интенсивность подачи:

$$J_{\text{кр}} = 0,12 - 0,10 = 0,02 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

4. Строим график  $q_{уд} = f(J)$ . Поскольку из практики известно, что  $J_{опт} = (2-3)J_{кр}$ , задаем следующие значения  $J$ : 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07 и 0,08 л/(с·м<sup>2</sup>). Принимаем  $B = 1$  с. По формуле (4.26) получаем следующие значения  $q_{уд}$  и для удобства заносим их в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчета

$J, \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
$q_{уд}, \text{ л}/\text{м}^2$	0,15	0,12	0,115	0,12	0,13	0,14

По результатам расчета строим график зависимости удельного расхода раствора пенообразователя от интенсивности подачи (рис. 4.2).

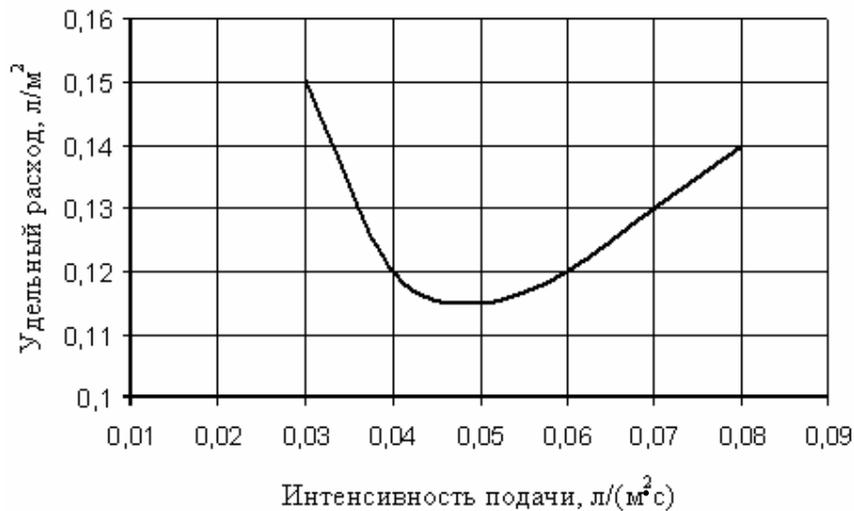


Рис. 4.2. Зависимость удельного расхода от интенсивности подачи

*Ответ:* критическая интенсивность подачи равна 0,02 л/(м<sup>2</sup>·с), оптимальная – 0,05 л/(м<sup>2</sup>·с).

Пример 15.

Определить теоретически необходимую интенсивность подачи тонкораспыленной воды для тушения пламени ацетона. Удельная массовая скорость выгорания составляет 0,047 кг/(м<sup>2</sup>·с); низшая теплота сгорания – 31403,1 кДж/кг; коэффициент полноты сгорания – 0,85; температура потухания ацетона – 950 °С.

Решение.

1. Определяем интенсивность тепловыделения с 1 м<sup>2</sup> площади горения, кВт/м<sup>2</sup>, кДж/(м<sup>2</sup>·с):

$$q'_{п} = \beta v_{м}^{уд} Q_{н} = 0,85 \cdot 0,047 \cdot 31403,1 = 1254,55 \text{ кВт}/\text{м}^2.$$

2. Определяем охлаждающий эффект воды при объемном тушении (формула (4.13)):

$$Q_{\text{охл}} = 4,2(100 - 20) + 2260 + 2,2(950 - 100) = 4466 \text{ кДж/л.}$$

3. Принимаем коэффициент излучения  $f = 0,3$ , коэффициент  $k = 0,28$  (см. формулу (4.41)) и по формуле (4.36) находим теоретическую интенсивность подачи воды:

$$J^0 = \frac{(1 - 0,3)0,28 \cdot 1254,55}{4466} = 0,055 \approx 0,06 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с).}$$

Пример 16.

Рассчитать теоретическое время тушения пожара газовым огнетушащим составом в помещении объемом  $125 \text{ м}^3$ , когда оно практически герметично и в случае открытия одного проема размерами: высота –  $1,6 \text{ м}$ , ширина –  $1,3 \text{ м}$ . Огнетушащая концентрация газа –  $36,0 \%$  (об.), плотность –  $1,4 \text{ кг/м}^3$ , секундный расход –  $0,4 \text{ кг/с}$ . Температура пожара в момент начала тушения  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Плотность продуктов горения при  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  составляет  $0,86 \text{ кг/м}^3$ . Температура воздуха  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Решение.

Время тушения нейтральным газом (то есть время достижения огнетушащей концентрации) в помещении заданного объема можно определить по формуле (4.21):

$$\tau_{\text{T}} = \frac{2V_{\text{пом}} a_{\text{огн}}}{2v_{\text{гос}} - v_{\text{пг}} a_{\text{огн}}},$$

где  $v_{\text{гос}}$  – расход ГОС,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v_{\text{пг}}$  – расход продуктов горения через проем,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $V_{\text{пом}}$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ ;  $a_{\text{огн}}$  – огнетушащая концентрация газа, выраженная в объемных долях.

Для первого случая расход продуктов горения можно принять равным нулю. Тогда формула (4.21) принимает вид

$$\tau_{\text{T}} = \frac{V_{\text{пом}} a_{\text{огн}}}{v_{\text{гос}}}.$$

Секундный расход нейтрального газа должен быть выражен в  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$v_{\text{гос}} = \frac{0,4}{1,4} = 0,29 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда расчетное время тушения составит:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{125 \cdot 0,36}{0,29} = 155 \text{ с.}$$

Для второго случая, когда осуществляется газообмен через открытый проем, необходимо учитывать потери огнетушащего газа вместе с выходящими продуктами горения. Расход продуктов горения определяется по формуле (4.22):

$$v_{\text{пр}} = \frac{2}{3} \mu \frac{(S_{\text{пр}} - S_1)}{\rho_{\text{пр}}} \sqrt{2g(H_{\text{пр}} - h_0) \rho_{\text{пр}} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пр}})},$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проема ( $\mu \approx 0,65$ );  $H_{\text{пр}}$  – высота проема, м;  $h_0$  – высота плоскости равных давлений, м;  $\rho_{\text{пр}}$  – плотность продуктов горения, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S_{\text{пр}}$  – площадь проема, м<sup>2</sup>;  $S_1$  – площадь приточной части проема, м<sup>2</sup> ( $S_1 = B_{\text{пр}}h_0$ , где  $B_{\text{пр}}$  – ширина проема, м).

Высота плоскости равных давлений  $h_0$  находится по формуле

$$h_0 = \frac{H_{\text{пр}}}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{пр}}}}}.$$

Плотность воздуха при 20 °С равна 1,2 кг/м<sup>3</sup>. Тогда

$$h_0 = \frac{1,6}{1 + \sqrt[3]{\frac{1,2}{0,86}}} = 0,76 \text{ м.}$$

Расход продуктов горения равен:

$$v_{\text{пр}} = \frac{2}{3} 0,65 \frac{(1,3 \cdot 1,6 - 1,3 \cdot 0,76)}{0,86} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,86 (1,6 - 0,76) (1,2 - 0,86)} = 1,2 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расчетное время тушения при наличии открытого проема равно:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{2 \cdot 125 \cdot 0,36}{2 \cdot 0,36 - 1,2 \cdot 0,36} = 350 \text{ с.}$$

## Контрольные задачи

1. Найти фактическую интенсивность подачи воды, если на тушение пожара площадью 200 м<sup>2</sup> было подано 2 ствола с расходом 3,6 л/с каждый и 2 ствола с расходом 7,2 л/с.

2. Рассчитать суммарный удельный расход воды, если пожар площадью  $400 \text{ м}^2$  был потушен двумя стволами с расходом  $7 \text{ л/с}$  каждый и двумя стволами с расходом  $20 \text{ л/с}$  каждый. Время тушения составило  $120 \text{ мин}$ .

3. Рассчитать секундный расход воды, требуемый для тушения пожара в складском помещении размерами  $36 \times 24 \text{ м}$  при времени свободного развития (до подачи первого ствола)  $10, 15, 25, 30$  и  $35 \text{ мин}$ . Линейная скорость распространения пожара  $1 \text{ м/мин}$ . Пожар возник в углу. Требуемая интенсивность подачи  $0,1 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

4. Для прекращения горения твердого горючего материала от  $1 \text{ м}^2$  его поверхности необходимо отвести  $4000 \text{ кДж}$  тепла в течение  $2 \text{ мин}$ . Определить требуемые удельный расход и интенсивность подачи воды, если коэффициент ее использования равен  $0,1$ .

5. Определить площадь тушения водяного ствола с расходом  $3,6 \text{ л/с}$ , если требуемая интенсивность подачи  $0,12 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

6. Определить теоретически необходимую интенсивность подачи тонкораспыленной воды для тушения пламени бутилового спирта. Удельная массовая скорость выгорания составляет  $0,0135 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ ; низшая теплота сгорания –  $36144,9 \text{ кДж/кг}$ ; коэффициент полноты сгорания –  $0,85$ .

7. Определить коэффициент использования воды, если на тушение пожара площадью  $200 \text{ м}^2$  было введено  $3$  ствола РС-70 и  $6$  стволов РС-50. Время подачи воды составило  $40 \text{ мин}$ .

8. Определить кратность пены, если емкость объемом  $10 \text{ л}$ , заполненная доверху пеной из пеногенератора, имеет массу  $0,825 \text{ кг}$ . Масса пустой емкости равна  $0,7 \text{ кг}$ .

9. При тушении разлива ЛВЖ пеной можно обеспечить интенсивность подачи  $0,065, 0,075$  и  $0,085 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Время тушения составит  $670, 630$  и  $580 \text{ с}$  соответственно. Какая интенсивность подачи является предпочтительной?

10. Определить интенсивность разрушения пены, если толщина ее слоя в резервуаре после тушения составила  $0,4 \text{ м}$ . Площадь резервуара –  $28 \text{ м}^2$ , интенсивность подачи –  $0,8 \text{ л/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , время подачи –  $40 \text{ с}$ , кратность пены –  $100$ .

11. Определить критическую интенсивность подачи раствора пенообразователя, если толщина слоя пены в опытном резервуаре после тушения составила  $0,4 \text{ м}$ . Площадь резервуара –  $28 \text{ м}^2$ . Пена подавалась двумя ГПС-200 в течение  $40 \text{ с}$ .

12. Рассчитать толщину слоя пены на поверхности ГЖ в резервуаре после тушения. Интенсивность подачи составляла  $0,09 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , критическая интенсивность –  $0,06 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , время тушения – 10 мин, кратность пены – 100.

13. Определить расход ГОС в кг/с, обеспечивающий прекращение горения в помещении за нормативное время подачи, равное 60 с. Объем помещения равен  $80 \text{ м}^3$ . В помещении имеется открытое вентиляционное отверстие размерами  $0,4 \times 0,4 \text{ м}$ . Огнетушащее вещество – аргон,  $\varphi_{\text{огн}} = 39 \%$ . Температура пожара в момент начала тушения равна  $700 \text{ }^\circ\text{С}$ .

14. Определить критический размер проема, при котором невозможно тушение пожара в помещении газовым огнетушащим составом. В помещении имеется один открытый проем квадратного сечения, объем помещения  $120 \text{ м}^3$ , нейтральный газ – азот,  $\varphi_{\text{огн}} = 34 \%$ . Температура продуктов горения  $600 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расход ГОС на тушение составляет  $1,5 \text{ кг/с}$ .

### Задание для самостоятельной работы

Найти теоретическую оптимальную интенсивность подачи, требуемый секундный расход огнетушащего вещества, удельный расход и количество стволов, необходимых для тушения пожара древесины на заданной площади. Способ тушения – по поверхности. Вариант задания выбирается по порядковому номеру учащегося в журнале группы (табл. 4.4 и 4.5).

Таблица 4.4

#### Исходные данные для самостоятельной работы

№ п/п	Массовая приведенная скорость выгорания $v_m^{\text{пр}}$ , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Площадь пожара $S_{\text{п}}$ , $\text{м}^2$	Коэффициент поверхности $K_{\text{п}}$	Низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}$ , $\text{кДж}/\text{кг}$	Удельная теплота пиролиза $L$ , $\text{кДж}/\text{кг}$
1	0,0075	20	12	18500	2750
2	0,0080	12	10	18700	2780
3	0,0055	25	8	19000	2800
4	0,0060	10	6	19200	2820
5	0,0065	15	5	19500	2840
6	0,0070	8	10	19900	2720
7	0,0085	30	6	20000	2850
8	0,0080	14	12	20300	2880
9	0,0065	35	6	20800	2750
10	0,0060	6	8	21000	2780
11	0,0085	28	4	18500	2800
12	0,0070	15	7	18700	2820
13	0,0075	40	9	19000	2840
14	0,0080	12	12	19200	2720

Окончание табл. 4.4

№ п/п	Массовая приведенная скорость выгорания $v_m^{пр}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Площадь пожара $S_{п}$ , м <sup>2</sup>	Коэффициент поверхности $K_{п}$	Нижшая теплота сгорания $Q_{н}$ , кДж/кг	Удельная теплота пиролиза $L$ , кДж/кг
15	0,0055	25	10	19500	2850
16	0,0060	10	4	19900	2880
17	0,0065	20	6	20000	2750
18	0,0070	12	12	20300	2780
19	0,0085	25	5	20800	2800
20	0,0080	10	8	21000	2820
21	0,0065	15	4	18500	2840
22	0,0060	8	7	18700	2720
23	0,0085	30	9	19000	2850
24	0,0070	14	12	19200	2880
25	0,0055	35	8	19500	2800
26	0,0060	28	6	19900	2820
27	0,0065	6	10	20000	2840
28	0,0070	15	8	20300	2720
29	0,0085	40	6	20800	2850
30	0,0080	12	8	21000	2880

Таблица 4.5

**Исходные данные для самостоятельной работы**

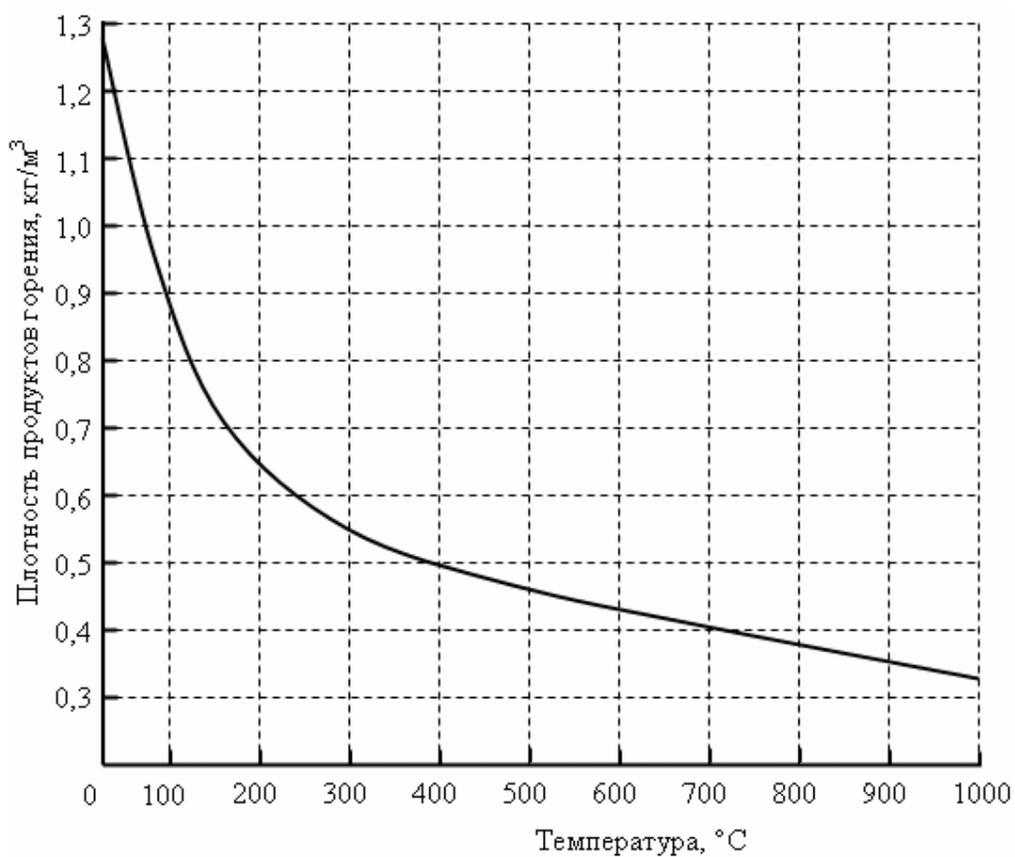
№ п/п	Время свободного горения, мин	Внешний падающий тепловой поток $q_{вн}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Расход ствола, $q_{ств}$ , л/с, кг/с	Тип ствола
1	5	36	3,5	РС-50
2	8	38	7,0	РС-70
3	12	40	5,5	РСКО
4	10	42	3,6	РС-50
5	15	35	7,2	РС-70
6	6	32	3,5	РС-50
7	18	40	7,0	РС-70
8	7	36	3,5	РС-50
9	5	34	7,2	РС-70
10	8	35	3,6	РС-50
11	12	45	3,5	РС-50
12	10	32	5,5	РСКО
13	15	36	7,0	РС-70
14	6	38	3,6	РС-50
15	18	30	7,0	РС-70
16	7	32	3,6	РС-50
17	15	35	3,5	РС-50

Окончание табл. 4.5

№ п/п	Время свободного горения, мин	Внешний падающий тепловой поток $q_{вв}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Расход ствола, $q_{ств}$ , л/с, кг/с	Тип ствола
18	8	40	7,0	РС-70
19	12	45	5,5	РСКО
20	10	42	7,2	РС-70
21	15	38	3,5	РС-50
22	6	30	3,6	РС-50
23	18	45	7,2	РС-70
24	7	38	3,5	РС-50
25	5	36	5,5	РСКО
26	8	28	7,2	РС-70
27	12	40	5,5	РСКО
28	10	45	3,6	РС-50
29	15	35	7,0	РС-70
30	6	42	3,5	РС-50

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1



Зависимость плотности газообразных продуктов горения от температуры

**ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА [4, 5]**

Объекты, материалы	$v_{л}$ , м/мин
Административные здания	1–1,5
Больницы: здание II степени огнестойкости здание III степени огнестойкости	0,6–1,0 2,0–3,0
Жилые дома (здание III степени огнестойкости)	0,5–0,8
Лесопильные цехи: здание III степени огнестойкости здание V степени огнестойкости	1,0–3,0 2,0 – 5,0
Склады: торфа в штабелях круглого леса в штабелях льноволокна бумаги в рулонах синтетического каучука	0,8–1,0 0,6–1,0 3,0–0,4 0,2–0,3 0,6–1,0
Сушильные отделения кожзавода (здание III степени огнестойкости)	1,5–2,2
Сгораемые покрытия больших площадей (включая пустоты)	1,7–3,2
Типографии (здание III степени огнестойкости)	0,5–0,8
Театры (сцены)	1,0–3,0
Холодильники	0,5–0,7
Цехи: текстильного производства деревообрабатывающего комбината	0,3–0,6 1,0–1,6
Древесина (доски в штабеле при толщине 2 – 4 см) при влажности, %: 8–10 16–18 18–20 20–30 более 30	4,0 2,3 1,6 1,2 1,0
Пенополиуретан	0,7–0,8
Резинотехнические изделия (штабели на открытой площадке)	1,0–1,2
Волокнистые материалы во взрыхлённом состоянии	7,0–8,0

**ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ  
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ [1, 2]**

Таблица 1

Температура, °С	Теплосодержание, кДж/моль						Температура, °С
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1	100
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5	200
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2	300
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2	400
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3	500
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5	600
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9	700
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3	800
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8	900
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3	1000
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9	1100
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5	1200
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2	1300
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,8	1400
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4	1500
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1	1600
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8	1700
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6	1800
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2	1900
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1	2000
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7	2100
2200	78,1	74,1	71,7	120,8	98,8	110,5	2200
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2	2300
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0	2400
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8	2500
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	119,4	141,6	2600
2700	97,9	92,6	93,1	101,5	124,8	147,3	2700
2800	101,8	96,4	96,8	107,6	130,3	153,0	2800
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8	2900
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7	3000

**ЭНТАЛЬПИЯ (ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ) ГАЗОВ  
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ [1, 2]**

Таблица 2

Температура, °С	Теплосодержание $\Delta H \cdot 10^{-2}$ , кДж/м <sup>3</sup>						Температура, °С
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Воздух	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	
100	1,3	1,3	1,3	1,7	1,5	1,8	100
200	2,7	2,6	2,6	3,6	3,0	3,8	200
300	4,1	3,9	3,9	5,6	4,7	5,9	300
400	5,5	5,3	5,3	7,7	5,9	8,2	400
500	6,7	6,7	6,7	9,3	6,3	10,3	500
600	8,5	8,1	8,1	12,3	9,7	12,7	600
700	10,0	9,5	9,6	14,6	11,5	15,1	700
800	11,6	11,0	11,1	17,1	13,4	17,5	800
900	13,2	12,5	12,6	19,5	15,3	19,9	900
1000	14,8	14,0	14,1	22,1	17,2	22,4	1000
1100	16,4	15,5	15,6	24,6	19,3	24,9	1100
1200	18,0	17,1	17,2	27,2	21,3	27,4	1200
1300	19,7	18,6	18,8	29,8	23,5	29,8	1300
1400	21,3	20,1	20,4	32,4	25,6	22,4	1400
1500	23,0	21,8	21,9	35,1	27,8	34,9	1500
1600	24,6	23,4	23,6	37,7	30,0	37,5	1600
1700	26,3	25,0	25,2	40,4	32,3	40,0	1700
1800	28,0	26,6	26,8	43,1	34,6	42,6	1800
1900	29,7	28,2	28,4	45,8	36,9	45,3	1900
2000	31,4	29,8	30,0	48,5	39,3	47,9	2000
2100	33,1	31,4	31,7	51,2	41,7	50,6	2100
2200	35,0	33,0	33,3	53,9	44,1	53,4	2200
2300	36,6	34,7	35,0	56,6	46,7	56,1	2300
2400	38,3	36,3	36,6	59,3	48,9	58,9	2400
2500	40,0	38,0	38,3	62,1	51,4	61,7	2500
2600	41,8	39,5	40,0	64,9	53,9	64,6	2600
2700	43,7	41,4	41,6	67,6	56,4	67,5	2700
2800	45,5	43,0	43,2	70,3	59,0	70,5	2800
2900	47,3	44,7	44,8	73,1	61,6	73,5	2900
3000	49,4	46,3	46,5	75,9	64,3	76,6	3000

## ТЕПЛОТА ОБРАЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ [1, 2]

Таблица 3

Вещество	Химическая формула	Теплота образования, кДж/моль
1	2	3
Альдегид муравьиный (ж)	$\text{CH}_2\text{O}$	121,1
уксусный (ж)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	166,3
Аммиак (газ)	$\text{NH}_3$	46,1
Анилин (ж)	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	29,7
Антрацен (тв)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	-101,4
Ацетилен (газ)	$\text{C}_2\text{H}_2$	-224,6
Ацетон (ж)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	248,1
Бензол (ж)	$\text{C}_6\text{H}_6$	-34,8
Бугадиен-1,3 (ж)	$\text{C}_4\text{H}_6$	-104,3
н-Бутан (газ)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	132,4
н-Бутан (ж)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	153,8
Бутен-1 (газ)	$\text{C}_4\text{H}_8$	6,3
Винилхлорид (газ)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	-37,7
Винилхлорид (ж)	$\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$	-17,2
Вода (ж)	$\text{H}_2\text{O}$	286,6
Вода (газ)	$\text{H}_2\text{O}$	242,2
н-Гексан	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	167,2
н-Гептан	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	239,7
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	675,4
Диоксид серы	$\text{SO}_2$	297,5
углерода	$\text{CO}_2$	396,6
Дифенил (тв)	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}$	-80,4
Изобутан (ж)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	159,2
Кислота бензойная (тв)	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	394,3
масляная	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	525,0
муравьиная (ж)	$\text{CH}_2\text{O}_2$	419,0
олеиновая	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	625,1
пропионовая (ж)	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$	458,4
стеариновая (тв)	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	937,7
уксусная (ж)	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	485,6

Продолжение прил. 3

Окончание табл. 3

1	2	3
Нафталин	$C_{10}H_8$	-62,8
Нитроэтан (ж)	$C_2H_5O_2N$	144,1
Оксид углерода	CO	112,7
н-Пентан (ж)	$C_5H_{12}$	184,4
Пропан (газ)	$C_3H_8$	109,4
Пропан (ж)	$C_3H_8$	125,3
Сероводород	$H_2S$	201,1
Сероуглерод (ж)	$CS_2$	-88,0
Спирт		
н-амиловый	$C_5H_{12}O$	359,1
н-бугиловый	$C_4H_{10}O$	341,5
н-гексиловый	$C_6H_{14}O$	385,1
метиловый (ж)	$CH_4O$	239,0
пропиловый (ж)	$C_3H_8O$	307,1
этиловый (ж)	$C_2H_6O$	278,2
Толуол (ж)	$C_7H_8$	4,19
Фенол (тв)	$C_6H_6O$	171,4
Этан (газ)	$C_2H_6$	88,4
Этилбензол (ж)	$C_8H_{10}$	33,1
Этилен	$C_2H_4$	-48,6
Этиленгликоль (ж)	$C_2H_6O_2$	455,4
Эфир		
диметиловый (ж)	$(CH_3)_2O$	207,8
диэтиловый (ж)	$(C_2H_5)_2O$	283,2
укусно-амиловый	$(C_2H_5)_2O$	594,7
укусно-метиловый (ж)	$C_6H_{12}O_2$	411,9
укусно-пропиловый (ж)	$C_5H_{12}O$	513,7
укусно-этиловый (ж)	$C_4H_{10}O$	480,2

**НИЗШАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ  
НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ [4, 6]**

Таблица 4

Вещества и материалы	Химическая формула	Теплота сгорания, кДж/кг
1	2	3
<b>Газы</b>		
Аммиак	$\text{NH}_3$	18585
Ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2$	49965
н-Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	45713
1,3-Бутадиен (дивинил)	$\text{C}_4\text{H}_6$	44573
Водород	$\text{H}_2$	119841
Метан	$\text{CH}_4$	50000
Оксид углерода	$\text{CO}$	10104
Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8$	46353
Пропилен	$\text{C}_3\text{H}_6$	45604
Сероводород	$\text{H}_2\text{S}$	31341
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6$	52413
Этилен	$\text{C}_2\text{H}_4$	46988
<b>Жидкости</b>		
н-Амиловый спирт	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	38385
Анилин	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	32386
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	31360
Бензин АИ-93 (летний) (ГОСТ 2084-67)	$\text{C}_{7,024}\text{H}_{13,706}$	43641
Бензин АИ-93 (зимний) (ГОСТ 2084-67)	$\text{C}_{6,911}\text{H}_{12,168}$	43641
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6$	40576
н-Бутиловый спирт	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	36805
н-Гексан	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	45105
н-Гексиловый спирт	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$	39587
Гептан	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	44919
Глицерин	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	16102
Декан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	44602
Дизельное топливо «З» (ГОСТ 305-73)	$\text{C}_{12,343}\text{H}_{23,889}$	43590
Дизельное топливо «Л» (ГОСТ 305-73)	$\text{C}_{14,511}\text{H}_{29,120}$	43419
Диэтиловый эфир	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	34147
1,2-Дихлорэтан	$\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$	10873

**Окончание прил. 3**  
Окончание табл. 4

1	2	3
н-Додекан	$C_{12}H_{26}$	44470
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	36743
Изопентан	$C_5H_{12}$	45239
Изопропиловый спирт	$C_3H_8O$	34139
Керосин осветительный КО-20 (ГОСТ 4753-68)	$C_{13,595} H_{26,860}$	43692
н-Ксилол	$C_8H_{10}$	41207
Масло трансформаторное (ГОСТ 10121-62)	$C_{21,74} H_{42,28} S_{0,04}$	43111
Метиловый спирт	$CH_4O$	23839
н-Нонан	$C_9H_{20}$	44684
н-Октан	$C_8H_{18}$	44787
н-Пентан	$C_5H_{12}$	45350
н-Пропиловый спирт	$C_3H_8O$	34405
Толуол	$C_7H_8$	40936
Сероуглерод	$CS_2$	14020
Стирол	$C_8H_8$	43888
Уайт-спирит (ГОСТ 3134-52)	$C_{10,5} H_{21,0}$	43966
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	13097
Этиловый спирт	$C_2H_6O$	30562
<b>Твердые вещества</b>		
Бумага	–	15100
Древесина в изделиях	–	13800
Линолеум поливинилхлоридный	–	14310
двухслойный	–	17910
на войлочной основе	–	6570
на тканевой основе	–	20290
Нафталин	$C_{10}H_8$	39435
Поликарбонат	–	3100
Полиметилметакрилат (оргстекло)	–	27670
Полипропилен	–	45670
Полистирол	–	39800 - 40700
Полиэтилен	–	46588
Пенополистирол ПСБ	–	41630,8
Пенопласт ФФ	–	31384
Пенополиуретан	–	24853 - 27363
Резина	–	36000
Фанера	–	16100
Хлопок	–	16700
Шерсть	–	21800

**Приложение 4**

**СКОРОСТЬ ВЫГОРАНИЯ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ [4]**

Таблица 1

Жидкость	Скорость выгорания		Жидкость	Скорость выгорания	
	массовая кг/(м <sup>2</sup> ·с)	линейная мм/с		массовая кг/(м <sup>2</sup> ·с)	линейная мм/с
Ацетон	0,047	0,055	Нефть	0,02	0,0267
Бензол	0,038	0,052	Мазут	0,035	0,036
Бензин	0,045 – 0,053	0,063 – 0,075	Керосин	0,0483	0,06
Бутиловый спирт	0,0135	0,0186	Сероуглерод	0,036	0,0284
Диэтиловый эфир	0,06	0,083	Толуол	0,038	0,045
Изопентан	0,105	0,167	Этиловый спирт	0,0266 – 0,0334	0,0334 – 0,042

**СКОРОСТЬ ВЫГОРАНИЯ НЕКОТОРЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ [4]**

Таблица 2

Твердые материалы	Удельная массовая скорость выгорания кг/(м <sup>2</sup> ·с)
Бумага разрыхлённая	0,0108
Древесина в изделиях ( $W = 8 - 10 \%$ )	0,014
Калий металлический	0,014
Натрий металлический	0,014
Карболитовые изделия	0,0063
Органическое стекло	0,0143
Полистирол	0,0143
Полимеры в штабеле на открытой площадке	0,112
Резинотехнические изделия	0,0112
Текстолит	0,0067
Каучук натуральный	0,0133
Каучук синтетический	0,0088
Кинопленка целлулоидная	1,17
Книги на деревянных стеллажах	0,0055
Торфоплиты	0,0055
Торф в караванах ( $W = 40 \%$ )	0,003
Хлопок разрыхлённый	0,004
Штапельное волокно разрыхлённое	0,0067
Этрол ацетилцеллюлозный	0,015
Фенопласты	0,0058

Приложение 5

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПИРОЛИЗА  
НЕКОТОРЫХ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ [3]

Горючее вещество	Теплота пиролиза $L$ , кДж/кг
Фенопласт	1640
Полиизоциануратный пенопласт*	3670
Полиэтилен	2320
Полипропилен	2030
Поликарбонат	2070
Полистирол*	1760
Пенофенопласт*	3740
Полиметилметакрилат*	1620
Пенополиуретан мягкий*	1220
Пенополиуретан жесткий*	1190
Пенополистирол*	1360

\*Содержащие антипирен

Приложение 6

ОГNETУШАЩИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВЫХ СОСТАВОВ [5]

Таблица 1

Горючее вещество	Огнетушашая концентрация, % (об.)			
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	Инерген*
н-Гептан	34,9	34,6	39,0	36,5
Этанол	35,7	36,0	46,8	36,0
Бензин А-76 (АИ-80)	–	33,8	44,3	–
Масло машинное	–	27,8	36,1	28,3

Таблица 2

Горючее вещество	Огнетушашая концентрация хладона, % (об.)				
	23 (CF <sub>3</sub> H)	125 (C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> H)	218 (C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )	227 (C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> H)	318Ц(C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> н)
н-Гептан	14,6	9,8	7,2	7,2	7,8
Этанол	–	11,7	–	–	7,8
Вакуумное масло	–	9,5	–	–	–
Бензин АИ-80	–	–	6,7	7,3	–

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андросов А. С., Бегиев И. Р., Салеев Е. П. Теория горения и взрыва. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007.
2. Андросов А. С., Салеев Е. П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008.
3. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990.
4. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980.
5. Терехнев В. В., Артемьев Н. С., Грачев В. А. Справочник спасателя–пожарного. – М: Центр пропаганды, 2006.
6. Шебеко Ю. Н., Смолин И. М., Молчадский И. С. и др. Пособие по применению НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности» при рассмотрении проектно-сметной документации. – М.: ВНИИПО, 1998.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Параметры пожаров.....	3
Глава 2. Газообмен на внутреннем пожаре. Режимы пожаров.....	19
Глава 3. Расчет площади пожара в условиях неограниченного газообмена.....	31
Глава 4. Параметры тушения горючих веществ и материалов.....	52
Приложения.....	86
Литература.....	96

Учебное издание

Бобков Сергей Анатольевич  
Бабурин Александр Владимирович  
Комраков Петр Владимирович

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ  
ПО КУРСУ  
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Г. А. Науменко*  
Технический редактор *Е. А. Пушкина*  
Корректор *Н. В. Федькова*  
Компьютерный набор *С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков*

Подписано в печать 27.01.2010 г. Формат 60×90 1/16.  
Печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 9,5. Бумага офсетная.  
Тираж 400 экз. Заказ

Академия ГПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4