

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

Академия Государственной противопожарной службы

**Методические указания к решению задач
и выполнению контрольных работ по дисциплине
«Физико-химические основы развития
и тушения пожаров»**

Для слушателей
Института заочного и дистанционного обучения.
Цикл обучения – 3 года;
направление 280700 – «Техносферная безопасность»,
профиль 280706 – «Пожарная безопасность»,
квалификация «бакалавр»

Москва 2013

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

Методические указания к решению задач
и выполнению контрольных работ по дисциплине
«Физико-химические основы развития
и тушения пожаров»

Для слушателей
Института заочного и дистанционного обучения.
Цикл обучения – 3 года;
направление 280700 – «Техносферная безопасность»,
профиль 280706 – «Пожарная безопасность»,
квалификация «бакалавр»

Утверждено редакционно-издательским советом
Академии ГПС МЧС России в качестве учебно-методического пособия

Москва 2013

УДК 544
ББК 38.96
Б72

Р е ц е н з е н т ы:

Начальник кафедры общей и специальной химии
Академии ГПС МЧС России, доктор технических наук,
профессор *С.С. Воевода*

Доцент кафедры пожарной тактики и службы
в составе УНК Пожаротушения Академии ГПС МЧС России
А.Н. Григорьев

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

Б72 Методические указания к решению задач и выполнению контрольных работ по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров»: учеб.-метод. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – 37 с.

Издано в авторской редакции

Учебно-методическое пособие предназначено для слушателей Института заочного и дистанционного обучения Академии ГПС МЧС России, обучающихся 3 года; квалификация «бакалавр».

УДК 544
ББК 38.96

© Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2013

Введение

Программа дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» для слушателей 3-х летней заочной формы обучения, квалификации «бакалавр», предусматривает выполнение двух контрольных работ. Контрольная работа №1 включает решение трех задач, связанных с определением характеристик горючей нагрузки и некоторых параметров внутренних пожаров. Контрольная работа №2 предусматривает решение двух задач, связанных с определением основных параметров процесса прекращения горения. Контрольные работы допускается выполнять на листах формата А4 или в тетрадях. При оформлении работ на титульном листе (обложке тетради) необходимо указать свою фамилию, инициалы и номер зачетной книжки.

Текст каждой задачи, исходные данные следует переписывать полностью. Ход решения должен сопровождаться краткими пояснениями.

Выбор контрольного задания

Номер варианта в обоих контрольных работах определяется по двум последним цифрам зачетной книжки слушателя с помощью табл. 1.1. Например, номер зачетной книжки 96006. В соответствии с табл. 1.1 все задачи решаются по варианту 9.

Таблица 1.1

1-я цифра	2-я цифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	9	1	3	5	9	3	9	5	3	4
1	2	8	6	3	4	7	6	4	1	1
2	4	7	7	5	1	7	5	2	2	9
3	8	1	6	6	8	6	3	3	9	7
4	2	7	2	9	5	4	4	1	8	3
5	8	3	1	7	5	4	2	9	4	9
6	4	1	8	6	5	3	3	5	9	3
7	2	9	7	6	4	3	6	2	4	7
8	6	8	7	5	1	7	1	5	1	9
9	9	8	6	2	8	2	6	8	3	1

Контрольная работа №1

1. Методические указания и примеры решения задач по расчету параметров пожаров

1.1. Основные параметры пожаров.

Площадь пожара $S_{\text{п}}$ – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость. На практике, как правило, используют горизонтальную проекцию. Данный параметр является нормативным. Он служит для оценки обстановки на пожаре, расчета сил и средств, необходимых для его тушения. Однако при горении изделий и конструкций из твердых горючих материалов (ТГМ) площадь пожара, как правило, не соответствует физической площади горения.

Площадь поверхности горения $S_{\text{пг}}$ – характеризует реальную, физическую площадь ТГМ, которая участвует в горении, т. е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме. Величина $S_{\text{пг}}$ определяет количество образующихся газообразных продуктов и, соответственно, размеры зоны горения.

Коэффициент поверхности горения $K_{\text{пг}}$ – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{\text{пг}} = S_{\text{пг}}/S_{\text{п}}. \quad (1.1)$$

Из данного выражения следует, что площадь горения превышает площадь пожара в $K_{\text{пг}}$ раз. Например, в современных квартирах значение $K_{\text{пг}}$ составляет $3 \div 5$. Следовательно, если площадь пожара 3м^2 , то площадь горения и, соответственно площадь тушения, составляет $9 \div 15\text{м}^2$.

Линейная скорость распространения пожара $v_{\text{л}}$ – путь, который на данном объекте проходит фронт пламени в единицу времени, м/мин. Фактически это скорость распространения зоны горения по площади объекта.

Если горючим веществом на объекте является жидкость, то скорость распространения пожара практически равна скорости распространения пламени по поверхности жидкости. В зависимости от соотношения начальной температуры жидкости T_0 и температуры воспламенения $T_{\text{вп}}$ значение может изменяться в 10 раз. Так, если $T_0 < T_{\text{вп}}$, то $v_{\text{л}}$ редко превышает 0,05м/с. При $T_0 > T_{\text{вп}}$ линейная скорость равна скорости распространения пламени по паровоздушным смесям – 0,5м/с и более.

Если горючая нагрузка состоит из ТГМ, то $v_{\text{л}}$ зависит не только от скорости распространения пламени по поверхности ТГМ, но и от скорости его перехода с одного предмета на другой. Поэтому на $v_{\text{л}}$ влияет также характер размещения горючих изделий и материалов на объекте, интенсивность теплового излучения, направление и скорость газовых потоков. При рассредоточенной пожарной нагрузке интенсивности излучения от горящего предмета может быть недостаточно для воспламенения материалов

соседних предметов. Тогда пожар не распространится на всю площадь объекта и останется локальным.

Величина $v_{\text{л}}$ зависит также от состава газовой среды, поступающей в зону горения. Так, на внутренних пожарах, по мере развития процесса горения, концентрация кислорода в газовой среде уменьшается, температура пламени и, соответственно, его излучательная способность снижаются. Это приводит к уменьшению скорости распространения пламени по поверхности горючего. Вместе с тем, температура газовой среды в помещениях часто достигает температуры воспламенения материалов до того как пожар охватит все помещение. В этих случаях перед фронтом пламени образуется газоздушная смесь на нижнем концентрационном пределе, по которой пламя распространяется со скоростью до 50 м/с, т.е. практически мгновенно. Это явление называется общей вспышкой.

Таким образом, линейная скорость распространения пожара зависит от очень многих факторов, прогнозировать которые чрезвычайно сложно. По этому при пожарно-технических расчетах используют усредненные значения $v_{\text{л}}$, полученные в результате анализа параметров пожаров на различных объектах.

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:

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}}/S_{\text{п}}. \quad (1.2)$$

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

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}}/S_{\text{пт}}. \quad (1.3)$$

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

$$q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}}^{\text{абс}} Q_{\text{н}}, \quad (1.4)$$

где $Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг; β – 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.

Коэффициент избытка воздуха на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха $G_{\text{в}}^{\text{ф}}$ к требуемому $G_{\text{в}}^0$:

$$\alpha = G_{\text{в}}^{\text{ф}}/G_{\text{в}}^0. \quad (1.5)$$

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

$$G_B^0 = v_M^{уд} S_{\Pi} V_B^0 \rho_B, \quad (1.6)$$

где $v_M^{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²с), S_{Π} – площадь пожара, м²; V_B^0 – теоретический объём воздуха необходимый для горения, м³/кг; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

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

$$G_B^{\phi} = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_B (\rho_B - \rho_{\Pi})}, \quad (1.7)$$

где μ – 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/с²; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; ρ_{Π} – плотность продуктов горения, кг/м³.

Высота плоскости равных давлений h_0 – расстояние от плоскости равных давлений ПРД до нижней отметки проема.

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода соотношением:

$$a = \frac{21}{21 - j_{O_2}}. \quad (1.8)$$

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

$$h_0 = \frac{H_{\Pi}}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_B}{\rho_{\Pi}}}} = \frac{H_{\Pi}}{1 + \sqrt[3]{\frac{T_{\Pi}}{T_B}}}, \quad (1.9)$$

где H_{Π} – высота проема, м; T_{Π} , T_B – температура пожара и наружного воздуха соответственно, К.

Оценить плотность продуктов горения при заданной температуре можно по формуле, вытекающей из уравнения Менделеева - Клапейрона:

$$\rho_{\Pi} = \rho_B \frac{T_B}{T_{\Pi}}, \quad \text{кг/м}^3, \quad (1.10)$$

где T_B и T_{Π} – температура воздуха и пожара соответственно, К.

При расчетах принимается $T_B = 293\text{К}$, соответственно $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Тогда:

$$\rho_{\Pi} \approx \frac{352}{T_{\Pi}}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (1.11)$$

Параметры пожаров в помещениях сильно зависят от свойств, количества и характера размещения горючих веществ и материалов.

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

$$p_{гн} = \frac{\sum m_i}{S}, \quad (1.12)$$

где m_i – масса i -го горючего материала, кг ; S – площадь размещения, м^2 .

Площадью размещения называется площадь участка, выделенного ограждающими конструкциями или противопожарными разрывами, на котором находятся горючие вещества и материалы. Если участки в помещении, на которых находятся горючие вещества и материалы, не разделены преградами с нормируемым пределом огнестойкости или проходами (проездами), ширина которых больше 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* $g_{пн}$, МДж/м^2 , – количество тепла, выделяемое горючей нагрузкой при полном сгорании:

$$g_{пн} = \frac{\sum m_i Q_{ни}}{S}, \quad (1.13)$$

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

Различают постоянную и временную пожарную нагрузку. К постоянной пожарной нагрузке относятся сгораемые элементы строительных конструкций здания и стационарно установленного оборудования. К временной нагрузке относят складированные горючие материалы, сырье, полуфабрикаты, мебель и т.п. Пожарная нагрузка всего помещения определяется как сумма постоянной и временной нагрузки.

1.2. Общие рекомендации к решению задач по определению параметров пожаров, параметров горючей и пожарной нагрузки.

Задачи 1 и 2 данной контрольной работы решаются с использованием формул (1.1) – (1.13). При этом для определения некоторых параметров может потребоваться трансформация исходных формул. Например, температуру внутреннего пожара можно оценить по величине h_0 , выразив ее из формулы (1.9). Концентрация кислорода в продуктах горения φ_{O_2} и коэффициент избытка воздуха α связаны соотношением (1.8). Отсюда:

$$\varphi_{\text{O}_2} = 21(\alpha - 1)/\alpha. \quad (1.14)$$

Формула для определения площади пожара $S_{\text{п}}$, при которой ϕ_{O_2} снижается до заданного значения выводится из формул (1.5), (1.6).

Пример 1. Рассчитать требуемый расход воздуха при горении в помещении ацетона в емкости диаметром 1,5м, если удельная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ равна 0,1 кг/(с·м²), теоретический объем воздуха $V_{\text{в}}^0$ составляет 7,35 м³/кг. Температура окружающей среды 20⁰С, давление нормальное.

Решение.

Расчетная формула для определения требуемого расхода воздуха имеет вид:

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

Площадь резервуара составляет:

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

Плотность воздуха для данных условий принимается 1,2 кг/м³.

Требуемый расход воздуха равен:

$$G_{\text{в}}^0 = 0,1 \cdot 7,35 \cdot 1,766 \cdot 1,2 = 1,54 \text{ кг/с.}$$

Пример 2. Рассчитать фактический расход воздуха через дверной проём размером 1,5×2,5м и определить положение плоскости равных давлений, если в помещении в резервуаре горит гептан. Среднеобъемная температура внутри помещения составляет 365⁰С, температура окружающей среды – 20⁰С, давление – нормальное.

Решение.

Фактический расход воздуха при газообмене через один проем рассчитывается по формуле (1.7):

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

Коэффициент сопротивления проема $\mu = 0,65$. Плотность продуктов горения:

$$\rho_{\text{пг}} = 352/T_{\text{п}} = 0,511 \text{ кг/м}^3.$$

Высоту плоскости равных давлений находим по формуле (1.9):

$$h_0 = \frac{2,5}{1 + \sqrt[3]{\frac{365 + 273}{20 + 273}}} = 1,09 \text{ м.}$$

Подставляем найденные величины в формулу (1.7):

$$G_B^\phi = \frac{2}{3} \mu B h_0 \sqrt{2 g h_0 \rho_B (\rho_B - \rho_{\text{ш}})} =$$

$$\frac{2}{3} 0,65 \cdot 1,5 \cdot 1,09 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,09 \cdot 1,2 (1,2 - 0,511)} = 2,9 \text{ кг/с.}$$

П р и м е р 3. Определить площадь пожара $S_{\text{п}}$ в помещении, при которой среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 16%. Фактический расход поступающего воздуха G_B составляет 1,6 кг/с, удельная массовая скорость выгорания $v_M^{\text{уд}}$ равна 0,06 кг/(м²с), теоретический объем воздуха $V_B^0 = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}$, плотность воздуха $\rho_B = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Р е ш е н и е.

Концентрация кислорода в продуктах горения ϕ_{O_2} определяет коэффициент избытка воздуха α . При наличии газообмена помещения с окружающей средой:

$$\alpha = G_B^\phi / G_B^0.$$

Требуемый расход воздуха G_B^0 рассчитывается по формуле (1.6):

$$G_B^0 = v_M^{\text{уд}} S_{\text{п}} V_B^0 \rho_B.$$

Откуда формула расчёта площади пожара приобретает вид:

$$S_{\text{п}} = \frac{G_B^\phi}{\alpha v_M^{\text{уд}} \rho_B V_B^0}.$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \phi_{O_2}} = \frac{21}{21 - 16} = 4,2.$$

Тогда площадь пожара, при которой $\phi_{O_2} = 16\%$ равна:

$$S_{\text{п}} = 1,6 / (4,2 \cdot 0,06 \cdot 4,2 \cdot 1,2) = 1,26 \text{ м}^2.$$

П р и м е р 4. Рассчитать приведенную массовую скорость выгорания штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за 15 минут 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 ρ составляет 450 кг/м³. Определить коэффициент поверхности данного штабеля.

Р е ш е н и е.

Приведенная массовая скорость выгорания рассчитывается по формуле 1.7.

Изменение массы штабеля за время горения равно:

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

где: η – доля выгоревшей массы штабеля; V – объём одного бруса, м³; k – количество брусьев в одном ряду, n – количество рядов в штабеле

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

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

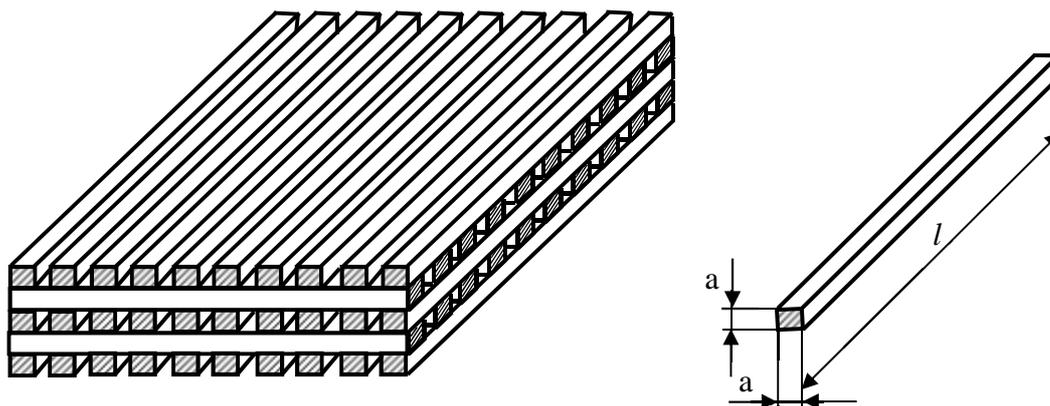


Рис. 1.1. Конструкция штабеля

Скрытая поверхность штабеля состоит из граней брусьев, находящихся в нижнем ряду и соприкасающихся с поверхностью земли, а также участков брусьев, соприкасающихся друг с другом. Суммарная площадь скрытой поверхности $S_{\text{скр}}$ равна:

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

где k – количество брусьев в одном ряду, n – количество рядов в штабеле

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

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

где $S_{\text{общ}}$ (общая поверхность штабеля) – сумма площадей всех граней одного бруса, умноженная на количество всех брусьев в штабеле $k \cdot n$:

$$S_{\text{общ}} = (2a^2 + 4al)kn,$$

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

Скрытая поверхность штабеля равна:

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

Поверхность горения штабеля $S_{\text{гг}}$ равна:

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

Приведенная массовая выгорания:

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

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

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

Коэффициент поверхности горения штабеля определяем по формуле (1.1):

$$K_{\text{п}} = 31/4 = 7,75.$$

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

Решение.

Расчет проводится по формулам 1.2 и 1.13:

$$p_{\text{гг}} = \frac{\sum m_i}{S_{\text{пол}}} \text{ и } g_{\text{гг}} = \frac{\sum m_i Q_{\text{ни}}}{S_{\text{пол}}}$$

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

Масса паркета $m_{\text{пар}}$:

$$m_{\text{пар}} = \rho V,$$

где V – объём паркета

$$V = S_{\text{п}} h = 12 \cdot 0,02 = 0,24 \text{ м}^3,$$
$$m_{\text{пар}} = 0,24 \cdot 450 = 108 \text{ кг}.$$

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

$$m_{\text{древ}} = 0,7 \cdot 95 = 66,5 \text{ кг},$$
$$m_{\text{ппу}} = 0,20 \cdot 95 = 19 \text{ кг},$$
$$m_{\text{кожи}} = 0,10 \cdot 95 = 9,5 \text{ кг}.$$

Удельная горючая нагрузка $p_{\text{гг}}$ 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:

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

1.3. Расчёт площади пожара в условиях неограниченного газообмена.

При решении задач, связанных с определением площади пожара, рекомендуется придерживаться следующих обозначений:

 – место возникновения пожара;
 $S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м²;
 τ – время, мин;
 $S_{\text{п}}^{\tau}$ – площадь пожара в момент времени τ , м²;
 L_{τ} – путь, пройденный фронтом пламени к моменту времени τ , м;
 $v_{\text{л}}^{\text{табл}}$ – табличное значение линейной скорости распространения пожара, м/мин.

Усреднённые значения линейной скорости ($v_{\text{л}}^{\text{табл}}$) для разных объектов приведены таблице приложения I.

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. пожара 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. 1.2 – 1.4).

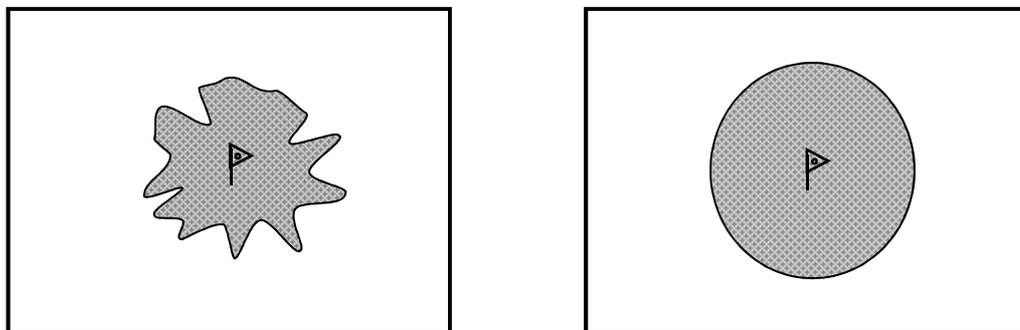


Рис. 1.2 Приведение формы пожара к круговой

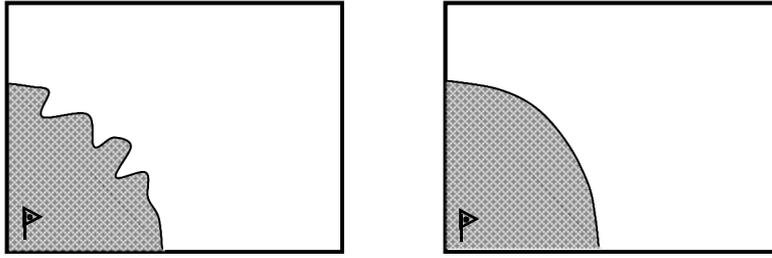


Рис. 1.3. Приведение формы пожара к угловой

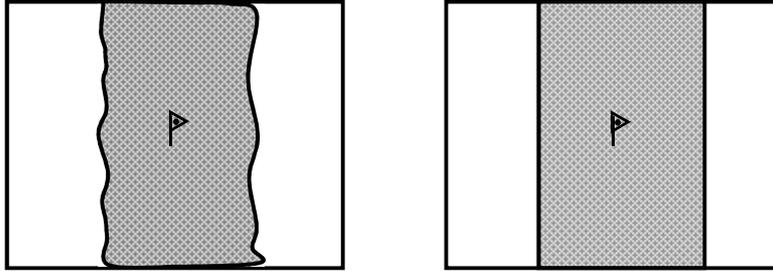


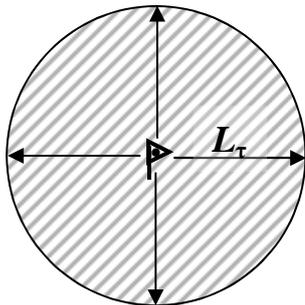
Рис.1.4. Приведение формы пожара к прямоугольной

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

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

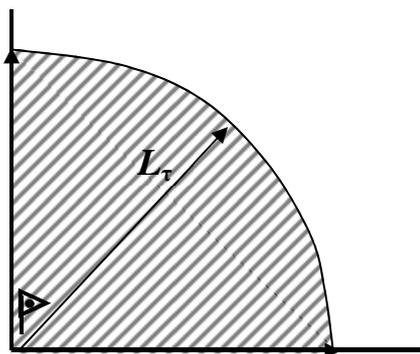
Таким образом, значение площади пожара $S_{п}$ в каждый момент времени рассчитывается по следующим основным формулам:

1. Круговой пожар:



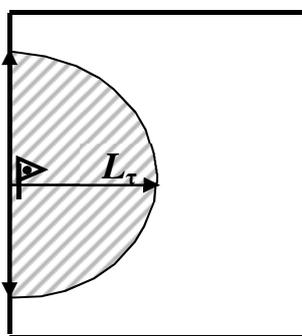
$$S_{п} = \pi L_{\tau}^2 \quad (1.15)$$

2. Пожар, возникший в углу помещения до момента достижения фронтом пламени ограждающей конструкции



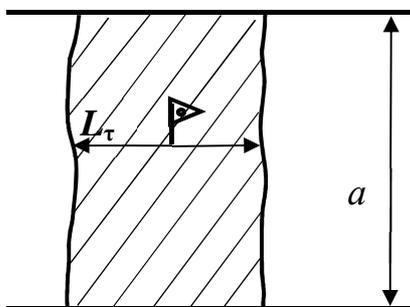
$$S_{\Pi} = \pi L_{\tau}^2 / 4 \quad (1.16)$$

3. Пожар, возникший возле стены до момента достижения фронтом пламени ограждающих конструкций



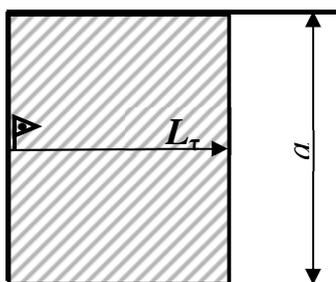
$$S_{\Pi} = \pi L_{\tau}^2 / 2 \quad (1.17)$$

4. Прямоугольная форма пожара (двухсторонняя)



$$S_{\Pi} = 2L_{\tau}a \quad (1.18)$$

5. Прямоугольная форма пожара (односторонняя)



$$S_{\Pi} = aL_{\tau} \quad (1.19)$$

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

$$L_{\tau} = 0,5v_{л}^{\text{табл}} \tau \text{ при } \tau \leq 10 \text{ мин,} \quad (1.20)$$

$$L_{\tau} = L_{10} + L_{\tau-10} \text{ при } \tau > 10 \text{ мин.} \quad (1.21)$$

Здесь:

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

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

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

Тогда при $\tau > 10$ мин:

$$L_{\tau} = 5v_{л}^{\text{табл}} + v_{л}^{\text{табл}}(\tau - 10) \quad (1.22)$$

или

$$L_{\tau} = v_{л}^{\text{табл}}(\tau - 5). \quad (1.23)$$

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 $S_{п}^{\tau}$ в масштабе строится зависимость $S_{п} = f(\tau)$, 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_{τ} ;
3. на плане помещения отложить L_{τ} , отметить сплошной ровной линией положение фронта пламени, указать значение τ ;
4. учитывая, что при достижении ограждающих конструкций фронт пламени спрямляется, определить форму полученной геометрической фигуры;
5. найти площадь пожара по одной из формул (1.15 – 1.19).

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 $v_{\text{д}} = 0,5v_{\text{д}}^{\text{табл}}$;
4. определить расстояние L_{τ} до первой опорной точки и найти время τ , за которое это расстояние будет пройдено, выразив его из формул (1.20) – если $L_{\tau} \leq L_{10}$, (1.22) или (1.23) – если $L_{\tau} > L_{10}$;
5. определить $S_{\text{п}}^{\tau}$, как описано выше;
6. повторить расчеты для всех остальных опорных точек;
7. построить план и график распространения пожара.

П р и м е р. Рассчитать площадь пожара на 5-й, 15-й и 20-й минутах с момента его возникновения (рис. 1.5) и время охвата всего помещения, если скорость распространения равна 1,2 м/мин, предел огнестойкости двери - 12 мин.

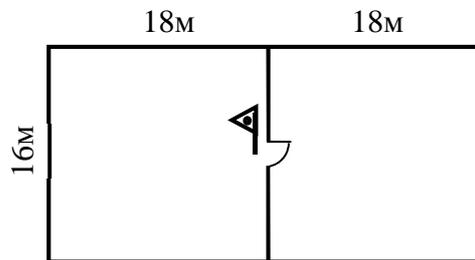


Рис. 1.5. План помещения и место возникновения пожара.

Р е ш е н и е.

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 минут фронт пламени пройдет расстояние $L_5 = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 5 = 3$ м. До ближайших боковых стен – 8 м. Следовательно, фронт пламени на 5-й минуте будет иметь форму полукруга (рис. 1.6): $S_{\text{п}}^5 = 3,14 \cdot 3^2 / 2 = 14,0 \text{ м}^2$.

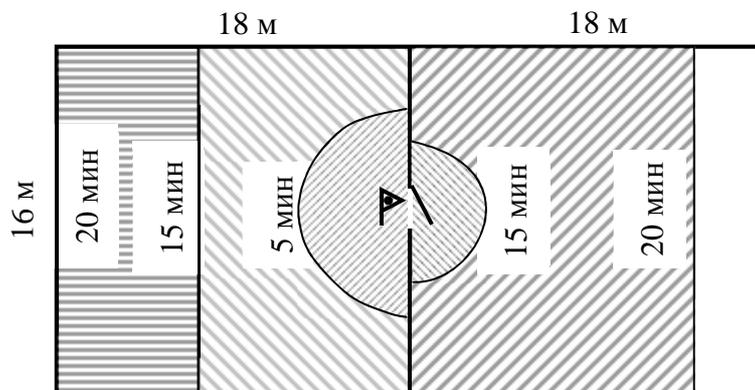


Рис. 1.6. План распространения пожара.

3. За 15 минут 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 16×12 м.

В смежном помещении он будет распространяться всего $15 - 12 = 3$ мин (причем скорость его равна $v_{\text{л}}^{\text{табл}}$, 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 $\pi \cdot 3,6^2 / 2 = 20$ м². Общая площадь пожара на 15-й минуте:

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

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. 1.6). 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. 1.6). 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, $S_{\text{п}}^5 = 14$ м²; $S_{\text{п}}^{15} = 212$ м²; $S_{\text{п}}^{20} = 442$ м², $S_{\text{п}}^{23} = 576$ м².

По этим данным строим график распространения пожара (рис. 1.7).

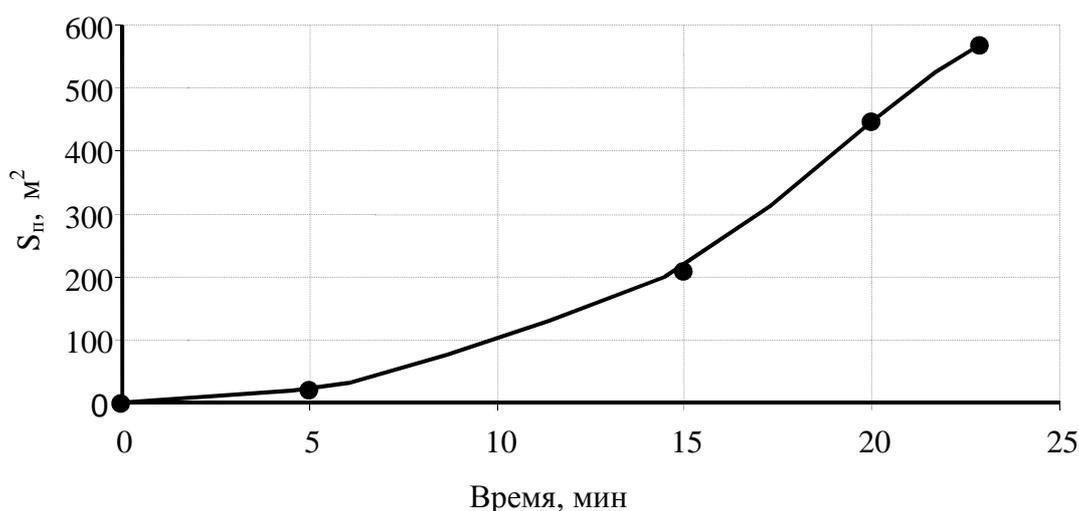


Рис. 1.7. График распространения пожара.

1.4. Контрольные задания.

Задача 1. Требуется определить значение параметра, для которого в таблице 1.2 указано «найти». Для всех вариантов задания коэффициент сопротивления проема μ принять равным 0,65.

Таблица 1.2

№	B , м	H , м	h_0 , м	ρ_v , кг/м ³	T_p , °С	$v_m^{уд}$, кг/(м ² с)	V_v^0 , м ³ /кг	S_p , м ²	α	Φ_{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

Условные обозначения: B , м – ширина проема; H , м – высота проема; h_0 , м – высота приточной части проема; μ – коэффициент сопротивления проема; ρ_v , кг/м³ – плотность воздуха; T_p , °С – температура пожара; $v_m^{уд}$, кг/(с·м²) – удельная массовая скорость выгорания; V_v^0 , м³/кг – теоретический объем воздуха; S_p , м² – площадь пожара; α – коэффициент избытка воздуха; Φ_{O_2} , % об. – концентрация кислорода в продуктах горения.

Задача 2. Определить удельную и приведенную массовую скорости выгорания, теплоту пожара при горении штабеля древесины; удельную горючую и удельную пожарную нагрузку. Штабель выложен из N брусков размером 1х0,05х0,05 м в n рядов. Время горения равно t , степень выгорания – Δm , площадь размещения – S . Плотность древесины принять равной 500 кг/м³, коэффициент полноты сгорания 0,8. Низшая теплота сгорания составляет 19000 кДж/кг.

Таблица 1.3

Номер варианта	S , м ²	N	n	t , мин	Δm , %
0	12	40	8	20	34
1	15	45	9	25	37
2	13	36	9	20	40
3	20	45	9	15	22
4	23	40	8	15	25
5	14	30	6	10	22
6	18	32	8	10	20
7	21	40	10	15	25
8	17	25	5	10	27
9	10	24	6	10	28

Задача 3. Определить площадь пожара в помещении при заданном по варианту расположении очага (рис. 1.8) на моменты времени: 7, 15, 20, 25 и 30 мин. Построить план и график развития пожара.

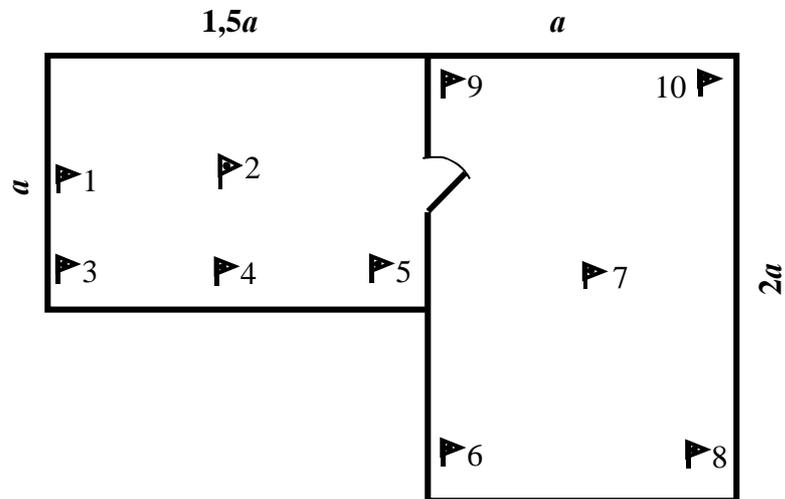


Рис. 1.8. Расположение очагов пожара.

Таблица 1.4

Условия задачи	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Место возникновения пожара	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10
Масштабный коэффициент a , м	10	8	6	10	8	6	8	8	10	8
Предел огнестойкости дверей, мин	12	9	12	9	0	18	0	12	9	12
Линейная скорость распространения, м/мин	0,6	1	0,6	1,2	0,8	0,6	1,2	1	1,4	1,2

Контрольная работа №2

2. Методические указания и примеры решения задач по расчету параметров тушения пожаров

2.1. Основные 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 газо-, 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.

Поэтому, 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 матери-

алов характеризуется следующими параметрами:

Время тушения τ_T – время от начала подачи огнетушащего вещества до момента прекращения горения.

Интенсивность подачи J – количество огнетушащего вещества, подаваемое на 1 м^2 площади пожара в секунду.

Удельный расход $q_{уд}$ – количество огнетушащего вещества (л, кг), израсходованное за время тушения в расчете либо на 1 м^2 площади пожара, либо на 1 м^3 объема помещения или на 1 м^3 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. 2.1. График 1 на данном рисунке называется «кривая тушения».

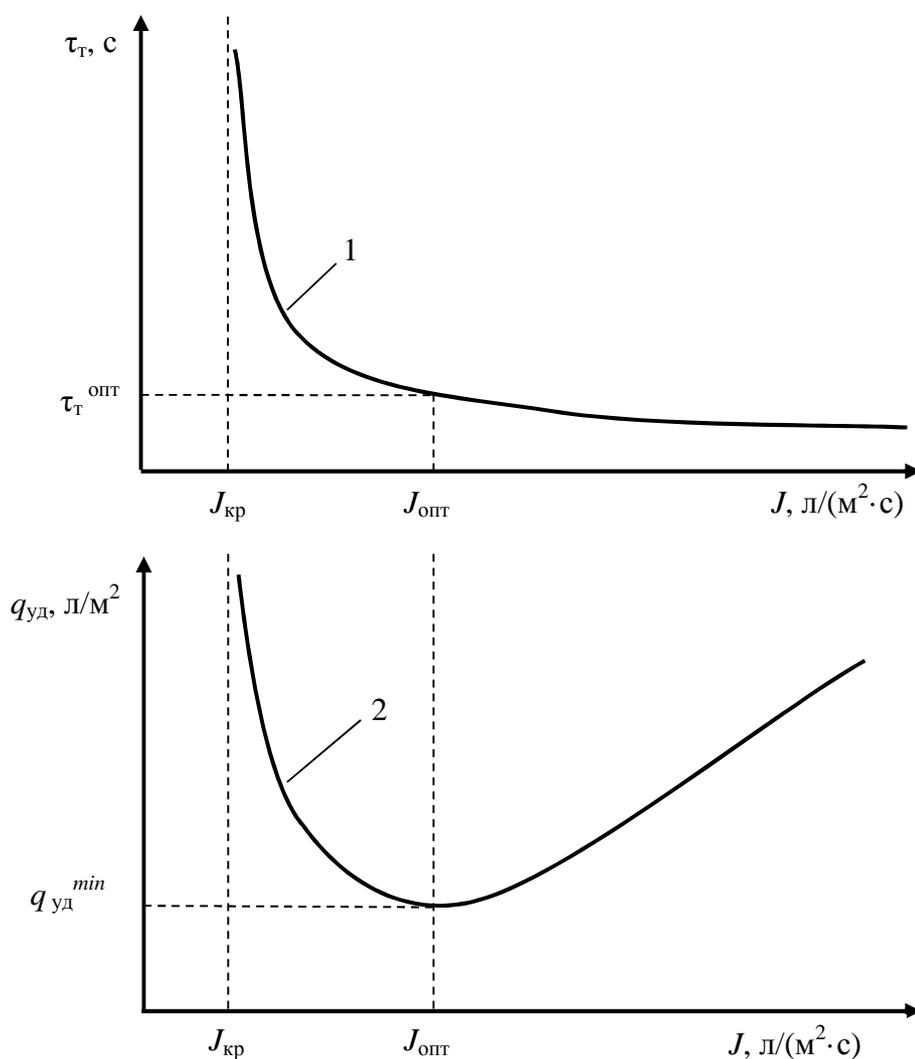


Рис. 2.1. Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода (2) от интенсивности подачи огнетушащего вещества.

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивностей подачи. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества оказывается равной критической, тушение не достигается и $\tau_T \rightarrow \infty$. При тушении пенами критической является интенсивность подачи, равная интенсивности разрушения пены; при тушении газовыми составами и аэрозолями – интенсивность утечки огнетушащего вещества из заполняемого объёма помещения; при тушении водой по поверхности – интенсивность подачи, компенсирующая лучистый тепловой поток к горячей 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 т.к. газы воспламеняются и горят при любой реально достижимой температуре. При этом механизмы отбора тепла в объеме пламени зависят от применяемого огнетушащего вещества.

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

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, требу-

мые 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 (газовых или аэрозольобразующих составов).

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:

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = [c (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r] v_{\text{м}}^{\text{уд}} + Q_{\text{зап}}/\tau_{\text{т}}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2.1)$$

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/(м²·с); $Q_{\text{зап}}$ – количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое, кДж/м²; $\tau_{\text{т}}$ – время тушения, с.

Тепло, аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле:

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \cdot \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \text{ кДж/м}^2, \quad (2.2)$$

где λ – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К); ρ – плотность жидкости, кг/м³; $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·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 $J \cdot Q$. Из уравнения (2.1) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя:

$$\tau_{\tau} = \frac{Q_{\text{зап}}}{JQ_{\text{охл}} - [c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_{\text{м}}^{\text{уд}}}, \text{ с}, \quad (2.3)$$

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 м^2 поверхности горения или 1 м^3 объема зоны горения.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель формулы (2.3) обращается в 0, является критической. В этом случае $\tau_{\tau} \rightarrow \infty$ и тушение становится невозможным. Из формулы (2.3) следует, что критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества при таком способе тушения жидкости равна:

$$J_{\text{кр}} = \frac{[c(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_{\text{м}}^{\text{уд}}}{Q_{\text{охл}}}, \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2) \text{ или } \text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2). \quad (2.4)$$

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°C физически не возможно. Для этой цели, в данном случае, подходят жидкий азот, твердая гранулированная углекислота или другие огнетушащие вещества с температурой кипения ниже -4°C . Если по каким-то причинам они не доступны, 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 (ТГМ)

Гомогенное (пламенное) горение 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 под-

держивается 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 формулой (2.2).

Горение ряда ТГМ сопровождается образованием углистого слоя. Это древесина, древеснонаполненные пластмассы, материалы на основе целлюлозы, сшитые полимеры – 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 $600\div 700^\circ\text{C}$, что является достаточным для зажигания горючих газовых смесей.

Удельный запас тепла $Q_{\text{зап}}$, накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения равен:

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \tau_{\text{гор}}, \text{ кДж/м}^2, \quad (2.5)$$

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

Значение $q_{\text{зап}}$ определяется из уравнения теплового баланса горения:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2.6)$$

где $q_{\text{вн}}$ – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м^2 ; $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, $\text{кг/(с}\cdot\text{м}^2)$; 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^2 .

Отсюда:

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \tau_{\text{гор}}, \text{ кДж/м}^2. \quad (2.7)$$

Величина $q_{\text{конв}}$ определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_{\text{р}}(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \text{ кВт/м}^2, \quad (2.8)$$

где $c_{\text{р}}$ – средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$, $c_{\text{р}} \approx 3,7 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности при горении, $T_{\text{пов}} \approx 700^\circ\text{C}$; $T_{\text{пир}}$ – температура пиролиза, $T_{\text{пир}} \approx 200^\circ\text{C}$.

Теплота пиролиза L зависит от вида горючего материала (см. приложение 2). Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза $L_{\text{экз}}$ присутствует при горении древесины и содержащих ее композиционных мате-

риалов. В расчетах $L_{экз}$, 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:

$$Q_{отв} \geq Q_{треб} = Q_{пов} + Q_{зап}, \text{ кДж/м}^2, \quad (2.9)$$

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

Здесь:

$$Q_{пов} = q_{луч} \tau_T, \text{ кДж/м}^2, \quad (2.10)$$

где: $q_{луч}$ – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения, кВт/м^2 ; τ_T – время тушения, с.

Если подаваемое огнетушащее вещество поступает к поверхности без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность, количество тепла, отбираемое за время τ_T от 1м^2 поверхности горения $Q_{отв}$ будет равно:

$$Q_{отв} = J \cdot Q_{охл} \cdot \tau_T, \text{ кДж/м}^2, \quad (2.11)$$

где J – интенсивность подачи, $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ или $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; τ_T – время подачи огнетушащего вещества, с.

Отсюда теоретическое, минимально возможное, время тушения по механизму отвода тепла от поверхности:

$$t_T = \frac{Q_{зап}}{J \cdot Q_{охл} - q_{вн}}, \text{ с.} \quad (2.12)$$

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

При $J \rightarrow \infty$ время тушения $\tau_{\text{T}} \rightarrow 0$. Однако минимальное время прекращения горения не может быть меньше времени охлаждения всего прогретого слоя τ_0 . Это физическое время определяется термическим сопротивлением материала. Например, при охлаждении древесины водой оно составляет примерно 20с.

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

$$\tau_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0, \text{ с.} \quad (2.13)$$

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

Умножив обе части (2.13) на J , получим выражение для удельного расхода:

$$q_{\text{уд}} \geq \frac{Q_{\text{зап}}}{J \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} \cdot J + \tau_0 \cdot J, \text{ с.} \quad (2.14)$$

Оптимальная интенсивность подачи – при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества (см. рис. 2.1), находится дифференцированием уравнения (2.14) по J . Приравняв первую производную $dq_{\text{уд}}/dJ$ к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи:

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} q_{\text{вн}}}{\tau_0} + q_{\text{вн}}} \right), \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}. \quad (2.15)$$

Следует помнить, что значения $q_{\text{уд}}$ и $J_{\text{опт}}$, получаемые по формулам (2.14) и (2.15), относятся к площади поверхности горения $S_{\text{пг}}$. Для определения секундного расхода (g , л/с) и минимального запаса воды, требуемых для тушения данной площади пожара $S_{\text{п}}$, их необходимо умножить на коэффициент поверхности.

2.2. Примеры решения задач.

Пример 1. Определить критическую и оптимальную интенсивности подачи раствора пенообразователя по результатам опыта. Пена подавалась в течение 30с двумя ГПС-200. Площадь резервуара 30м^2 . Толщина слоя пены после тушения составила 0,3м.

Р е ш е н и е.

Процесс прекращения горения жидкости пеной можно условно разделить на две стадии: растекания пены по зеркалу жидкости и накапливания 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/(с·м²) по пенообразующему раствору. Произведение JK (K – кратность пены) равно интенсивности подачи пены. Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется критической $J_{кр}$.

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

$$J_{кр} = J - J_{нак}, \quad (2.16)$$

Если известен объем пены, накопленный к моменту тушения ($V_{нак}$), величину $J_{нак}$ можно вычислить по формуле:

$$J_{нак} = \frac{V_{нак} \cdot 10^3}{tF_p K} = \frac{HF_p \cdot 10^3}{tF_p K} = \frac{H \cdot 10^3}{tK}, \quad (2.17)$$

где H – толщина накопленного слоя пены, м; F_p – площадь зеркала жидкости (резервуара), м²; t – время подачи пены, с; K – кратность пены.

Коэффициент 10^3 необходим для перевода м³ в литры.

Оптимальной является интенсивность подачи J_{opt} , при которой удельный расход ($q_{уд}$) раствора пенообразователя минимален. Известно, что зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$t = B \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}, \quad (2.18)$$

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

Так как $q_{уд} = Jt$, можно записать:

$$q_{уд} = BJ \frac{J + J_{кр}}{J - J_{кр}}. \quad (2.19)$$

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

Расчетная производительность пеногенераторов типа ГПС составляет: ГПС-200 – 2л/с, ГПС-600 – 6л/с, ГПС-2000 – 20л/с.

1. Находим интенсивность подачи раствора:

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

где g – производительность пеногенератора по раствору, л/с; n – число пеногенераторов; S_p – площадь резервуара, м².

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

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

3. Находим критическую интенсивность подачи:

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

4. Строим график (рис. 2.2) $q_{\text{уд}} = f(J)$. Поскольку из практики известно, что $J_{\text{опт}} = (2 \div 3)J_{\text{кр}}$, задаем следующие значения J : 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07 и 0,08 л/(с·м²). Принимаем $B = 1$ с. По формуле (2.19) получаем следующие значения $q_{\text{уд}}$:

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

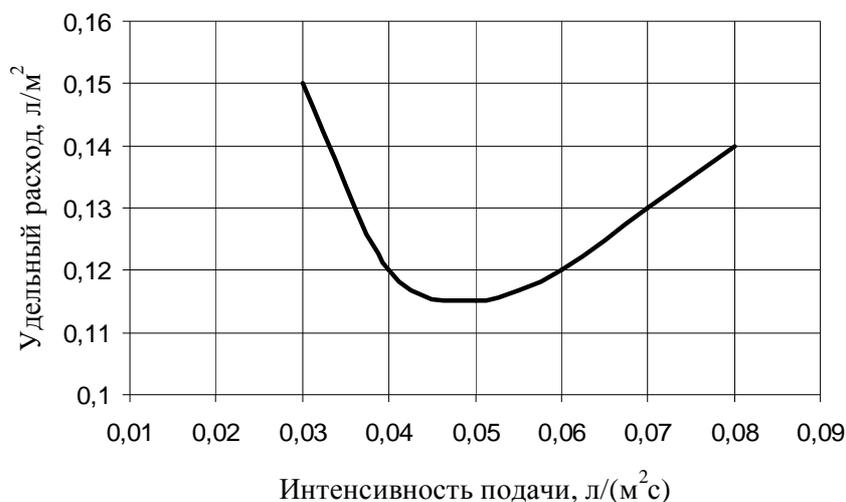


Рис. 2.2. График зависимости удельного расхода от интенсивности подачи.

Ответ: $J_{\text{кр}} = 0,02 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $J_{\text{опт}} = 0,05 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Пример 2. Рассчитать теоретическую оптимальную интенсивность подачи и удельный расход воды для тушения поверхности горячей древесины, если массовая приведенная скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 0,0085 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, внешний падающий тепловой поток $q_{\text{вн}} = 40 \text{ кВт}/\text{м}^2$, 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.

Р е ш е н и е:

Для прекращения горения древесины требуется понизить температуру ее поверхности с $T_{\text{пов}}$ до температуры начала активного пиролиза $T_{\text{пир}}$. Оптимальная интенсивность подачи рассчитывается по формуле (2.15):

$$J_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} \cdot q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right), \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2).$$

Значение $Q_{\text{зап}}$ находится по выражению (2.7) с использованием (2.8):

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \cdot \tau_{\text{гор}}, \text{ кДж}/\text{м}^2,$$

$$L_{\text{экз}} = 0,06 \cdot Q_{\text{н}}, \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_{\text{р}}(T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \text{ кВт}/\text{м}^2.$$

Подставив исходные данные, получим:

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

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

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

Отсюда оптимальная интенсивность подачи:

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

Удельный расход огнетушащего вещества равен интенсивности подачи, умноженной на $\tau_{\text{т}}$. Время тушения $\tau_{\text{т}}$ находим по формуле (2.13):

$$t_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{J \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + t_0 = \frac{4645}{0,052 \cdot 2600 - 40} + 20 \approx 69 \text{ с}.$$

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

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

Для расчета требуемого секундного расхода воды (g, л/с) и количества стволов определенного типа, значение $J_{\text{опт}}$ необходимо умножить на коэффициент поверхности $K_{\text{п}}$.

2.3. Контрольные задания.

Задача 1. Определить критическую и оптимальную интенсивности подачи раствора пенообразователя по результатам опыта. Время подачи – t . Пена подавалась n генераторами. Площадь резервуара равна S_p . Толщина слоя пены после тушения равна H (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Номер варианта	Пеногенератор	n	$S_p, \text{ м}^2$	$t, \text{ с}$	$H, \text{ м}$
0	ГПС-200	2	28	40	0,4
1	ГПС-600	2	113	60	0,5
2	ГПС-600	3	113	60	0,4
3	ГПС-200	1	28	60	0,3
4	ГПС-200	3	78	50	0,3
5	ГПС-200	2	78	90	0,6
6	ГПС-200	2	28	50	0,6
7	ГПС-600	4	314	90	0,6
8	ГПС-200	3	78	30	0,2
9	ГПС-200	2	28	50	0,6

Задача 2. 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. Исходные данные приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2.

№	Массовая приведенная скорость выгорания $v_m^{пр}, \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$	Площадь пожара $S_p, \text{ м}^2$	Коэффициент поверхности K_p	Низшая теплота сгорания $Q_{п}, \text{ кДж}/\text{кг}$	Удельная теплота пиролиза $L, \text{ кДж}/\text{кг}$
1	0,0075	40	6	18500	2750
2	0,0080	24	5	18700	2780
3	0,0055	50	4	19000	2800
4	0,0060	20	3	19200	2820
5	0,0065	25	3	19500	2840
6	0,0070	16	5	19900	2720
7	0,0085	60	3	20000	2850
8	0,0080	36	6	20300	2880
9	0,0065	70	3	20800	2750

Таблица 2.3.

№	Время свободного горения, мин.	Внешний падающий тепловой поток $q_{вн}$, кВт/м ²	Расход ствола, $g_{ств}$, л/с, кг/с.	Тип ствола
1.	5	36	3,5	РС-70
2.	8	38	7,0	РС-50
3.	12	40	5,5	РСКО
4.	10	42	3,6	РС-50
5.	15	35	7,2	РСКО
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

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ЛИНЕЙНАЯ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА

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 деревобрабатывающего 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 (штабеля на открытой площадке)	1,0–1,2
Волокнистые материалы во взрыхлённом состоянии	7,0–8,0

**УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПИРОЛИЗА
НЕКОТОРЫХ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ**

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Андросов А. С., Бегишев 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. Марков В.Ф., Маскаева Л.Н., Миронов М.П., Пазникова С.Н. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, 2009.
4. Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Примеры и задачи по курсу “Физико-химические основы развития и тушения пожара” М.: Академия ГПС МЧС России, 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Выбор контрольного задания	3
Контрольная работа № 1	4
1. Методические указания и примеры решения задач по расчету параметров пожаров.....	4
1.1. Основные параметры пожаров.....	4
1.2. Общие рекомендации к решению задач по определению параметров пожаров, параметров горючей и пожарной нагрузки.....	7
1.3. Расчёт площади пожара в условиях неограниченного газообмена.....	12
1.4. Контрольные задания.....	18
Контрольная работа №2.....	20
2. Методические указания и примеры решения задач по расчету параметров тушения пожаров.....	20
2.1. Основные параметры тушения горючих веществ и материалов	20
2.2. Примеры решения задач.....	27
2.3. Контрольные задания.....	31
Приложения.....	33
Литература.....	35

Учебное издание

Бобков Сергей Анатольевич
Бабурин Александр Владимирович
Комраков Петр Владимирович

Методические указания к решению задач
и выполнению контрольных работ по дисциплине
«Физико-химические основы развития
и тушения пожаров»

Для слушателей ИЗИДО 3-х летнего цикла обучения,
направление 280700 – «Техносферная безопасность»,
профиль 280706 – «Пожарная безопасность», квалификация «бакалавр»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Компьютерный набор *С.А. Бобков*.

Подписано в печать _____. Формат 60×90 1/16.
Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 1,7. Бумага офсетная.
Тираж 300 экз. Заказ

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