

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ
И ТУШЕНИЯ ПОЖАРА**

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве учебного пособия для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся
по направлению подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность, 20.04.01 Техносферная безопасность*

Под редакцией Н. В. Кострюковой

Учебное электронное издание сетевого доступа

ISBN 978-5-4221-1445-0

Уфа 2021

Авторы: Н. В. Кострюкова, О. Ю. Исаева, А. Н. Елизарьев, И. В. Вдовина

Рецензенты:

зам. начальника ГБУ Аварийно-спасательная служба РБ

(по противопожарной службе) Д. А. Салихов;

зам. директора ООО Экспертный центр пожарной безопасности «Пож-Протект»,

канд. техн. наук Ф. Н. Сулейманов

Физико-химические основы развития и тушения пожара : учебное пособие / под ред. Н. В. Кострюковой ; [Н. В. Кострюкова и др.] : [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-32.pdf

Представлены задачи по основным разделам дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожара». В конце каждого раздела приведены задачи для самостоятельного решения. Для решения задач даны необходимые справочные данные.

Предназначено для студентов всех форм обучения, изучающих дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожара», «Пожаровзрывобезопасность».

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Авторы: Кострюкова Наталья Викторовна, Исаева Оксана Юрьевна, Елизарьев Алексей Николаевич, Вдовина Ирина Валерьевна

Редактирование и верстка: *О. А. Соколова*

Программирование и компьютерный дизайн: *А. П. Меркулова*

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik.ugatu@yandex.ru

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Физико-химические основы развития и тушения пожара» и «Пожаровзрывобезопасность» занимают важное место в системе подготовки высококвалифицированных специалистов в области чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности. Физико-химические основы развития и тушения пожара являются теоретической базой для проектирования автоматических систем сигнализации и пожаротушения, проектирования пожарной техники и разработки тактических приемов и способов тушения пожаров.

Неотъемлемой составляющей при формировании компетенций является овладение умениями и навыками решения задач.

Целями данного пособия являются:

- усвоение, систематизация и закрепление теоретического материала;
- приобретение умений самостоятельно работать с учебной и справочной литературой;
- развитие практических умений и навыков решения типовых задач.

В пособии достаточно подробно разбирается алгоритм решения типовых задач. Для закрепления материала студентам предлагаются задачи для самостоятельного решения, при выполнении которых студенты оценивают степень своей подготовки по данному разделу дисциплины.

1. ТЕПЛООБМЕН НА ПОЖАРЕ

Существует три основных вида теплопереноса, отличающихся своим механизмом: *теплопроводность*, *конвекция*, *излучение*. Во время пожара одновременно присутствуют все три вида теплопереноса. Однако на той или иной стадии развития пожара или на каком-либо участке преобладает один из них.

Теплопроводность – процесс передачи тепла от одной части тела к другой или от одного тела к другому, непосредственно находящемуся в соприкосновении с ним, за счет хаотического теплового движения молекул и атомов. Процесс переноса тепла теплопроводностью происходит между непосредственно соприкасающимися телами или частицами тел различной температуры. Преобладает при низких значениях температуры.

Тепловой поток q (Вт) определяется законом теплопроводности, установленным Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S, \quad (1.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры вдоль направления теплопередачи,

К/м;

S – площадь поверхности, через которую передается тепло, м².

Знак «минус» означает, что теплота передается в направлении уменьшения температуры.

Коэффициент теплопроводности – справочная величина, однако ее значение зависит от температуры. Коэффициент теплопроводности равен количеству теплоты, проходящей через единицу поверхности в единицу времени, при условии, что температурный градиент равен единице.

Для установившегося режима горения количество тепла Q (Дж), прошедшего через слой вещества прямо пропорционально коэффициенту теплопроводности тела, градиенту температур, площади поверхности, через которую проходит тепло, и времени:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot S \cdot \tau, \quad (1.2)$$

где ΔT – разность температур между граничными плоскостями теплопроводящего слоя, К;

Δx – толщина слоя вещества, м;

S – площадь поверхности, через которую передается тепло, м²;

τ – время передачи тепла, с.

При передаче тепла через стену или перегородку определенной толщины требуется некоторое время, необходимое для повышения температуры внешней поверхности теплопроводящего слоя. *Время прогрева внешней поверхности стены* τ (с) определяется по формуле

$$\tau = \frac{(\Delta x)^2}{16\alpha}, \quad (1.3)$$

где Δx – толщина стены, м;

α – температуропроводность материала, м²/с, определяемая из соотношения:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho},$$

где C_p – изобарная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К);

ρ – плотность вещества, кг/м³.

Значения коэффициента теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности приведены в прил. 1.

Конвекция – перенос тепла в неравномерно нагретой жидкой, газообразной или сыпучей среде потоками вещества за счет движения среды и ее теплопроводных свойств.

Конвекция бывает естественная (за счет силы Архимеда) и вынужденная (при работе вентиляции или других устройств). Конвективный теплообмен зависит от физических свойств среды, скорости и характера ее движения и имеет место на всех стадиях пожара, но особенно важную роль он играет на начальной стадии, когда уровень теплового излучения еще невысок.

Количественно конвективный теплоперенос описывается эмпирической формулой Ньютона для теплового потока q_k (Вт):

$$q_k = \alpha_k \cdot \Delta T \cdot S, \quad (1.4)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, или конвекционной теплопередачи, Вт/(м²·К);

ΔT – разность температур между нагретыми газами и окружающими телами, К.

Излучение – перенос тепла посредством электромагнитных волн видимого и инфракрасного спектра. Источниками излучения в пламени являются нагретые газы и образующиеся при горении мельчайшие частицы дыма и сажи.

Согласно закону Стефана–Больцмана суммарная энергия, излучаемая телом пропорциональна T^4 . Тогда лучистый тепловой поток $q_{\text{л}}$ (Вт), передаваемый от нагретого тела по нормали к его поверхности, определяется по формуле

$$q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S, \quad (1.5)$$

где ε – *степень черноты излучающего тела* (отношение излучательной способности тела к излучательной способности абсолютно черного тела);

T – температура излучающего тела, К;

σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Теплообмен излучением является двусторонним процессом. Излучающее тело одновременно поглощает излучение, испускаемое окружающей средой с температурой T_0 .

Величину лучистого теплового потока $q_{\text{л}}$, падающего на 1 м² поверхности от нагретого до температуры T тела в зависимости от его степени черноты и расстояния до облучаемой поверхности, можно рассчитать по формуле на основе закона Стефана–Больцмана

$$q_{\text{л}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S \cdot \cos\theta}{\pi \cdot r^2}, \quad (1.6)$$

где θ – угол отклонения излучения от нормали,

T – температура излучающего тела, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

r – расстояние до облучаемого объекта, м.

Пример 1.

В результате пожара значение температуры внутренней поверхности стены помещения толщиной 100 мм повысилось до 230 °С. Каково значение теплового потока через стену, если материал стены – огнеупорный кирпич? Оцените время прогрева и выравнивания температуры. Значение температуры внешней поверх-

ности стены равно 25 °С. Коэффициент теплопроводности кирпича 0,814 Вт/(м·К), температуропроводность $5,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Решение.

Согласно закону Фурье тепловой потока, передаваемый за счет теплопроводности через слой вещества толщиной Δx , может быть рассчитан по формуле (1.1).

Тогда тепловой поток через 1 м² поверхности

$$q = 0,814 \cdot \frac{503 - 298}{0,1} \cdot 1 = 1668,7 \text{ Вт.}$$

Время прогрева внешней поверхности стены до 230 °С определяется по формуле (1.3)

$$\tau = \frac{0,1^2}{16 \cdot 5142 \cdot 10^{-7}} = 1216 \text{ с} = 20,3 \text{ мин.}$$

Пример 2.

Рассчитать, на сколько градусов и за какое время повысится значение температуры внешней стороны стены из огнеупорного кирпича толщиной 200 мм в результате внутреннего пожара, если значение плотности теплового потока через стену составило 800 Вт/м². Коэффициент теплопроводности 0,814 Вт/(м·К). Температуропроводность $5,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Решение.

Разность температур можно выразить из формулы (1.1)

$$\Delta T = \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda} = \frac{800 \cdot 0,2}{0,814} = 197 \text{ К.}$$

Время прогрева внешней поверхности стены определяется по формуле (1.3)

$$\tau = \frac{0,2^2}{16 \cdot 5,14 \cdot 10^{-7}} = 4864 \text{ с} = 81,06 \text{ мин.}$$

Пример 3.

Определить значение температуры на наружной поверхности печи, если стенки ее выполнены из шамотного кирпича толщиной 150 мм, а значение температуры на внутренней поверхности – 990 °С.

Плотность теплового потока 5150 Вт/м^2 , коэффициент теплопроводности $1,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Возможно ли самовоспламенение промасленной ветоши, сложенной возле стенки печи, если значение температуры ее самовоспламенения не менее $95 \text{ }^\circ\text{C}$?

Решение.

Разность температур можно выразить из формулы (1.1)

$$\Delta T = T_{\text{внутр}} - T_{\text{нар}} = \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda}.$$

Тогда

$$\Delta T = \frac{5150 \cdot 0,15}{1,12} = 690 \text{ К},$$

$$T_{\text{нар}} = T_{\text{внутр}} - \Delta T = 1263 - 690 = 573 \text{ К}.$$

Поскольку температура наружной поверхности стены больше температуры самовоспламенения промасленной ветоши, то возможно самовоспламенение ветоши, сложенной возле стенки печи.

Пример 4.

Рассчитать необходимую толщину слоя противопожарной изоляции печи, если она выполняется из каменноугольного шлака, коэффициент теплопроводности которого $0,287 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Значение температуры обогреваемой поверхности $850 \text{ }^\circ\text{C}$, а наружной поверхности не должно превышать $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность теплового потока 1500 Вт/м^2 .

Решение.

Толщина изоляции может быть выражена из формулы (1.1)

$$\Delta x = \lambda \frac{\Delta T}{q} = \frac{0,287 \cdot (1123 - 323)}{1500} = 0,153 \text{ м} = 153 \text{ мм}.$$

Пример 5.

Определить количество теплоты, сообщенной конвекцией от пламени спички в течение 20 с деревянному стержню площадью сечения 1 см^2 . Температура пламени – $700 \text{ }^\circ\text{C}$, поверхности стержня – $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопередачи для ламинарного пламени спички

$\alpha_k = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Возможно ли возгорание стержня, если критическое значение теплового потока $12 \text{ кВт}/\text{м}^2$?

Решение.

Количественно процесс конвективного теплопереноса описывается формулой Ньютона (1.4).

Исходя из этого уравнения, количество теплоты, сообщаемое пламенем спички, будет следующим:

$$Q_k = q_k \cdot \tau = 30 \cdot (973 - 293) \cdot (10^{-2})^2 \cdot 20 = 40,8 \text{ Дж.}$$

Это соответствует тепловому потоку

$$q_k = Q_k / \tau = 40,8 / 20 = 2,04 \text{ Вт.}$$

В пересчете на 1 м^2 деревянного стержня тепловой поток составит $2,04 \text{ Вт}/10^{-4} \text{ м}^2 = 20,4 \text{ кВт}/\text{м}^2$.

Для древесины возгорание наступает при тепловом потоке, равном $12 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Отсюда рассчитывается, что деревянный стержень площадью 1 см^2 воспламенится за $12,0 / 2,04 = 6 \text{ с}$.

Пример 6.

Какова величина теплового потока, передаваемого излучением от нагретой поверхности площадью 1 м^2 при температуре 100 °С и 1000 °С на расстоянии 1 м ; 10 м ? Степень черноты поверхности $0,9$, значение температуры окружающей среды 20 °С . Угол падения тепловых лучей принять равным нулю.

Решение.

Тепловой поток на расстоянии r определяется по формуле (1.6).

При $T = 373 \text{ К}$ и $r = 1 \text{ м}$

$$q_{373,1} = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (373^4 - 293^4) \cdot 1 \cdot \cos 0}{3,14 \cdot 1^2} = 195 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

При $T = 373 \text{ К}$ и $r = 10 \text{ м}$

$$q_{373,10} = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (373^4 - 293^4) \cdot 1 \cdot \cos 0}{3,14 \cdot 10^2} = 1,95 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

При $T = 1273$ К и $r = 1$ м

$$q_{1273,1} = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1273^4 - 293^4) \cdot 1 \cdot \cos 0}{3,14 \cdot 1^2} = 42558,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

При $T = 1273$ К и $r = 10$ м

$$q_{1273,10} = \frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1273^4 - 293^4) \cdot 1 \cdot \cos 0}{3,14 \cdot 10^2} = 425,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

При увеличении температуры от 100 до 1000 °С тепловой поток увеличивается почти в 220 раз.

Пример 7.

На каком расстоянии от очага горения бензина находится граница зоны теплового воздействия, позволяющая вести боевую работу при условии защищенности кожных покровов (4,2 кВт/м²)? Площадь поверхности излучения пламени 15 м², значение температуры окружающей среды 20 °С, степень черноты пламени 0,9. Значение температуры пламени бензина 1200 °С. Угол падения тепловых лучей принять равным нулю.

Решение.

Тепловой поток на расстоянии r определяется по формуле (1.6). Откуда расстояние

$$r = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S \cdot \cos \theta}{\pi \cdot q}}.$$

При $q = 4,2$ кВт/м² расстояние составит

$$r = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1473^4 - 293^4) \cdot 15 \cdot \cos 0}{3,14 \cdot 4200}} = 16,5 \text{ м}.$$

Пример 8.

В процессе развития пожара в помещении среднеобъемное значение температуры через 5 мин составило 80 °С, а через 30 мин – 800 °С. Как изменится доля радиационной составляющей теплопереноса к холодной стенке помещения (25 °С)? Принять

коэффициент теплопередачи конвекцией равным 15 Вт/м^2 . Степень черноты пламени $0,85$.

Решение.

Конвективный тепловой поток определяется по формуле (1.4).

Для расчета лучистого теплового потока используется формула (1.5) с учетом поправки на температуру окружающей среды

$$q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S.$$

При $80 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_{\text{к}} = 15 \cdot (353 - 298) = 825 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\text{л}} = 0,85 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (353^4 - 298^4) = 368 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\Sigma} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}} = 825 + 368 = 1193 \text{ Вт/м}^2.$$

Доля излучения составляет $368/1193 = 0,308$ (30,8 %).

При $800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_{\text{к}} = 15 \cdot (1073 - 298) = 11625 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\text{л}} = 0,85 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (1073^4 - 298^4) = 63505 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\Sigma} = q_{\text{к}} + q_{\text{л}} = 11625 + 63505 = 75130 \text{ Вт/м}^2.$$

Доля излучения составляет $63505 / 75130 = 0,845$ (84,5 %).

Таким образом, доля радиационной составляющей увеличится в 2,8 раза.

Задания для самостоятельной работы

1. Рассчитать, на сколько градусов и за какое время нагреется внутренняя поверхность стены помещения из кирпича толщиной 380 мм в результате внутреннего пожара, если коэффициент теплопроводности материала $0,736 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а начальное значение температуры в помещении $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Значение теплового потока через стену составляет 850 Вт . Коэффициент температуропроводности $5,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

2. В результате пожара значение температуры внутренней поверхности стены помещения толщиной 200 мм повысилась до $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Каково значение плотности теплового потока через стену,

если материал стены – бетон? Оцените время прогрева и выравнивания ее температуры. Значение температуры внешней поверхности стены равно $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопроводности бетона $1,3\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Температуропроводность $6,2\cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$.

3. Рассчитать необходимую толщину слоя противопожарной изоляции печи, если она выполняется из молотого диатомита, коэффициент теплопроводности которого $0,845\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Значение температуры обогреваемой поверхности $835\text{ }^{\circ}\text{C}$, а наружной поверхности не должно превышать $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плотность теплового потока $1100\text{ Вт}/\text{м}^2$.

4. Определить количество теплоты, сообщенной конвекцией от пламени спички в течение 3 мин деревянному стержню размерами $2\times 10\text{ см}$. Температура пламени – $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, поверхности стержня – $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплопередачи для ламинарного пламени спички $30\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

5. Определить коэффициент теплопередачи ламинарного пламени лабораторной горелки, значение температуры пламени которой $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, пластиковому покрытию площадью 2 см^2 . Количество теплоты, переданное покрытию за 2 мин составило 800 Дж , а начальное значение его температуры $18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. Определить значение лучистого теплового потока на расстоянии 10 м от нагретой до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ поверхности резервуара площадью 20 м^2 если степень черноты поверхности $0,9$, значение температуры воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а угол падения тепловых лучей 45 ° .

7. Определить температуру пламени очага пожара площадью 40 м^2 , если на расстоянии 25 м от него облученность составила $3500\text{ Вт}/\text{м}^2$. Степень черноты пламени $0,8$; значение температуры окружающей среды $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

8. На каком расстоянии от пламени мазута, горящего в резервуаре диаметром 6 м , значение лучистого теплового потока составит $14\text{ кВт}/\text{м}^2$? Значение температуры окружающей среды $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, степень черноты пламени $0,93$. Значение температуры пламени $980\text{ }^{\circ}\text{C}$. Угол падения тепловых лучей 0° .

9. В процессе развития пожара в помещении среднеобъемная температура через 5 мин составила $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а через 25 мин – $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить долю конвективной составляющей теплопереноса к холодной стенке помещения при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент

теплопередачи конвекцией принять равным $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Степень черноты пламени $0,85$.

10. В результате пожара значение температуры внутренней поверхности стены толщиной Δx (мм) повысилась до $t_{\text{внутр}}$ ($^{\circ}\text{C}$). Каково значение теплового потока через стену, если материал стены M ? Оцените время прогрева и выравнивания температуры. Значение температуры внешней поверхности стены равно $t_{\text{нар}}$ ($^{\circ}\text{C}$). Исходные данные приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные

Вар.	Материал стены M	Толщина стенки Δx , мм	Температура внутренней поверхности стены $t_{\text{внутр}}$, $^{\circ}\text{C}$	Температура внешней поверхности стены $t_{\text{нар}}$, $^{\circ}\text{C}$
1	Кирпич огнеупорный	100	200	30
2	Бетон	125	350	25
3	Медь	80	500	20
4	Сталь	70	400	35
5	Глина огнеупорная	60	250	23
6	Алюминий	65	280	30
7	Чугун	130	320	25
8	Бетон	110	380	18
9	Глина огнеупорная	95	360	24
10	Сталь углеродистая	55	450	32

11. В процессе развития пожара в помещении среднеобъемное значение температуры через τ (мин) составило t ($^{\circ}\text{C}$). Определить долю конвективной составляющей теплопереноса к холодной стене помещения температурой $t_{\text{ст}}$ ($^{\circ}\text{C}$). Коэффициент теплопередачи конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Степень черноты пламени ε . Исходные данные приведены в табл. 1.2.

12. На каком расстоянии от очага пожара находится граница зоны теплового воздействия, позволяющая вести боевую работу при условии защищенности кожных покровов ($4,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$) и неограниченное время без специальных средств защиты ($1,6 \text{ кВт}/\text{м}^2$). Температура пламени t ($^{\circ}\text{C}$). Площадь поверхности излучения пламе-

ни S (м^2), температура окружающей среды t_0 , степень черноты пламени ε . Исходные данные приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Исходные данные

Вар.	Время τ , мин	Среднеобъемная температура, t , °C	Температура стены $t_{\text{ст}}$, °C	Коэффициент конвекционной теплопередачи $\alpha_{\text{к}}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)	Степень черноты пламени ε
1	5	130	17	10	0,7
2	15	400	25	8	0,8
3	20	800	35	12	0,65
4	3	100	22	11	0,9
5	8	550	30	7	0,85
6	12	600	28	23	0,75
7	17	700	20	6	0,95
8	7	520	32	18	0,6
9	10	580	23	15	0,55
10	6	150	18	9	0,5

Таблица 1.3

Исходные данные

Вар.	Температура пламени t , °C	Температура окружающей среды t_0 , °C	Площадь поверхности S , м^2	Степень черноты пламени ε
1	3000	20	3	0,8
2	1000	15	10	0,9
3	1900	17	15	0,75
4	800	22	8	0,6
5	2100	10	20	0,65
6	1500	25	14	0,5
7	900	12	5	0,7
8	1700	8	12	0,95
9	1400	23	16	0,85
10	850	30	7	0,55

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОЖАРА

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

Время свободного развития пожара τ_0 (мин, ч) – время с момента возникновения горения до начала подачи огнетушащего вещества в очаг пожара.

Площадь пожара $S_{\text{п}}$ (м^2) – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость.

Площадь поверхности горения $S_{\text{пг}}$ (м^2) – 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 $K_{\text{п}}$ – отношение площади поверхности горения к площади пожара:

$$K_{\text{п}} = S_{\text{пг}}/S_{\text{п}}. \quad (2.1)$$

При горении жидкостей в резервуарах $K_{\text{п}} = 1$. При горении твердых материалов $K_{\text{п}} > 1$. По этой причине для одного и того же вида твердого горючего материала, например, древесины, почти все параметры пожара будут различными в зависимости от $K_{\text{п}}$ (горение бревен, досок, стружки).

Пожарная нагрузка $P_{\text{пн}}$ ($\text{кг}/\text{м}^2$) – масса всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м^2 площади пола помещения или площади, занимаемой этими материалами на открытой площадке:

$$P_{\text{пн}} = \frac{\sum m_i}{S}, \quad (2.2)$$

где m_i – масса горючих материалов, кг;

S – площадь размещения материалов, м^2 .

Тепловой эквивалент пожарной нагрузки $g_{\text{пн}}$, $\text{МДж}/\text{м}^2$, – количество теплоты, выделяемое горючей нагрузкой при полном сгорании:

$$g_{\text{пн}} = \frac{\sum m_i \cdot Q_{\text{ни}}}{S}, \quad (2.3)$$

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

Температура пожара $t_{\text{п}}$ (°С) или $T_{\text{п}}$ (К). Температурой внутреннего пожара считается среднеобъемная температура газовой среды в помещении, температурой открытого пожара – максимальная температура пламени.

Линейная скорость распространения пожара $v_{\text{л}}$ (м/с) – скорость распространения пламени по поверхности горючего материала.

Массовая скорость выгорания горючих веществ и материалов (массовая скорость выгорания абсолютная) $v_{\text{м}}^{\text{абс}}$ (кг/с) – масса горючего вещества, выгоревшая в единицу времени:

$$v_{\text{м}}^{\text{абс}} = m/\tau. \quad (2.4)$$

Удельная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ (кг/(с·м²)) – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}} / S_{\text{пг}}. \quad (2.5)$$

Приведенная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ (кг/(с·м²)) – масса горючего вещества или материала, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара:

$$v_{\text{м}}^{\text{пр}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}} / S_{\text{п}}. \quad (2.6)$$

Для жидкостей в емкостях приведенная и удельная массовые скорости выгорания равны, поскольку $S_{\text{п}} = S_{\text{пг}}$.

Теплота пожара q (кВт) – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени:

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot v_{\text{м}}^{\text{абс}} \cdot Q_{\text{н}}, \quad (2.7)$$

где β – коэффициент полноты сгорания;

$Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания вещества, кДж/кг.

Пример 1.

Определить теплоту пожара при горении материала, имеющего низшую теплоту сгорания 16000 кДж/кг, если табличное значение приведенной массовой скорости выгорания равно 0,015 кг/(м²·с), площадь пожара 20 м², коэффициент полноты сгорания – 0,9.

Решение.

Теплота пожара рассчитывается по формуле (2.7).

С учетом формулы для расчета приведенной массовой скорости выгорания (2.6) получается

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot v_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot S_{\text{п}} \cdot Q_{\text{н}},$$

$$q_{\text{п}} = 0,9 \cdot 0,015 \cdot 20 \cdot 16000 = 4320 \text{ кВт.}$$

Пример 2.

На сколько опустится уровень мазута за 20 мин горения в резервуаре? Плотность мазута составляет 940 кг/м^3 , удельная массовая скорость выгорания равна $0,03 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Рассчитать теплоту пожара, если диаметр резервуара 10 м, коэффициент полноты сгорания 0,85, низшая теплота сгорания мазута 41900 кДж/кг .

Решение.

Изменение уровня жидкости – Δh , время горения – τ , удельная массовая скорость выгорания – $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$, плотность жидкости – ρ .

Объем выгоревшей жидкости V равен произведению площади зеркала жидкости S на Δh (рис. 2.1):

$$V = S \cdot \Delta h.$$

Значение V также можно выразить через массу выгоревшего вещества m и плотность ρ :

$$V = m / \rho.$$

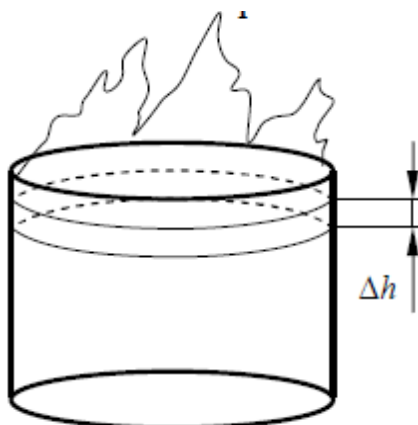


Рис. 2.1. Изменение уровня жидкости в резервуаре

Тогда

$$\Delta h = V / S = m / (\rho \cdot S).$$

В свою очередь, масса выгоревшего мазута может быть найдена из формул (2.4) и (2.5)

$$m = v_M^{\text{abc}} \cdot \tau = v_M^{\text{уд}} \cdot S \cdot \tau.$$

Уровень жидкости в резервуаре снизится на

$$\Delta h = \frac{v_M^{\text{уд}} \cdot \tau \cdot S}{\rho \cdot S} = \frac{0,03 \cdot 20 \cdot 60}{940} = 0,038\text{м} = 3,8 \text{ см.}$$

Теплота пожара рассчитывается по формуле (2.7). С учетом формулы (2.5) получается

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot v_M^{\text{уд}} \cdot S \cdot Q_{\text{н}}.$$

Площадь пожара равна площади резервуара и составляет

$$S_{\text{п}} = \pi r^2 = \pi d^2 / 4.$$

Тогда

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot v_M^{\text{уд}} \cdot Q_{\text{н}} \cdot \pi d^2 / 4,$$

$$q_{\text{п}} = 0,85 \cdot 0,03 \cdot 41900 \cdot 3,14 \cdot 10^2 / 4 = 83873 \text{ кВт.}$$

Пример 3.

За какое время горения уровень жидкости в резервуаре опустится на 4 см, если удельная массовая скорость выгорания равна 0,02 кг/(м²·с), а плотность жидкости составляет 850 кг/м³?

Решение.

Массу выгоревшего вещества m можно найти по формуле

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot \Delta h.$$

В свою очередь, $m = v_M^{\text{уд}} \cdot S \cdot \tau.$

Тогда

$$\tau = \frac{m}{v_M^{\text{уд}} \cdot S} = \frac{\rho \cdot \Delta h \cdot S}{v_M^{\text{уд}} \cdot S} = \frac{\rho \cdot \Delta h}{v_M^{\text{уд}}},$$

$$\tau = \frac{850 \cdot 0,04}{0,02} = 1700\text{с} = 28,3 \text{ мин.}$$

Пример 4.

Определить уровень нижней границы гомотермического слоя h при горении нефти в резервуаре. Начальный уровень жидкости $H=10$ м, время горения $\tau = 25$ мин. Плотность нефти $\rho = 850$ кг/м³, удельная массовая скорость выгорания $v_m^{уд} = 0,02$ кг/(м²·с), скорость нарастания гомотермического слоя $v_{гтс} = 8 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Решение.

Глубина, на которую опустится нижняя граница гомотермического слоя за время горения, складывается из толщины выгоревшего слоя нефти ΔH и толщины самого слоя $\delta_{гтс}$ (рис. 2.2).

Тогда

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

$$\Delta H = \tau \cdot v_{л};$$

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

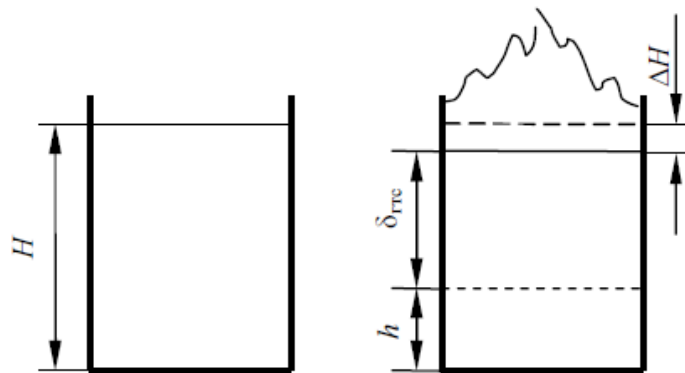


Рис. 2.2. Нарастание гомотермического слоя в резервуаре

Таким образом,

$$h = H - \tau (v_{л} + v_{гтс}).$$

Линейная скорость выгорания $v_{л}$ равна

$$v_{л} = v_m^{уд} / \rho = 0,02 / 850 = 2,35 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Тогда уровень нижней границы гомотермического слоя

$$h = 10 - 25 \cdot 60 (8 \cdot 10^{-4} + 2,35 \cdot 10^{-5}) = 8,765 \text{ м.}$$

Пример 5.

Определить время возникновения горения в торговом зале книжного магазина по следующим исходным данным. Пожар ликвидирован в 12 ч 00 мин. Площадь пожара равна площади помещения – 150 м². Масса горючего до пожара 20000 кг. Средняя степень выгорания 25 %. Среднее значение приведенной массовой скорости выгорания 0,008 кг/(м²·с).

Решение.

Продолжительность пожара можно найти из формулы (2.4)

$$\tau = m / v_M^{abc}.$$

С учетом $v_M^{abc} = v_M^{пр} \cdot S_{п} = 0,008 \cdot 150 = 1,2$ кг/с, получается

$$\tau = 0,25 \cdot 20000 / 1,2 = 4166,7 \text{ с} = 69,4 \text{ мин} \approx 70 \text{ мин (1 ч 10 мин)}.$$

Таким образом, время возникновения пожара

$$12 \text{ ч } 00 \text{ мин} - 1 \text{ ч } 10 \text{ мин} = 10 \text{ ч } 50 \text{ мин}.$$

Пример 6.

Определить массу сгоревшего материала и количество тепла, которое выделится на внутреннем пожаре за 25 мин, если площадь поверхности горения составляет 250 м², средний коэффициент поверхности равен 5, приведенная массовая скорость выгорания – 0,017 кг/(м²·с), низшая теплота сгорания горючего составляет 32 МДж/кг, коэффициент полноты сгорания – 0,85.

Решение.

Теплота пожара рассчитывается по формуле (2.7). С учетом формулы для расчета приведенной массовой скорости выгорания (2.6) получается

$$q_{п} = \beta \cdot v_M^{пр} \cdot S_{п} \cdot Q_H.$$

Из формулы (2.1) $S_{п} = S_{пг} / K_{п}$.

Таким образом,

$$q_{п} = \beta \cdot v_M^{пр} \cdot Q_H \cdot S_{пг} / K_{п} = 0,85 \cdot 0,017 \cdot 32 \cdot 10^6 \cdot 250 / 5 = 23,12 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Массу сгоревшего материала можно найти из формулы (2.4):

$$m = v_m^{\text{abc}} \cdot \tau = \tau \cdot v_m^{\text{пр}} \cdot S_{\text{пр}} / K_{\text{п}} = 25 \cdot 60 \cdot 0,017 \cdot 250 / 5 = 1276 \text{ кг.}$$

Пример 7.

Рассчитать удельную массовую скорость выгорания штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за $\tau = 15$ мин пожара его масса уменьшилась на 15 %. Штабель состоит из пяти рядов $n = 5$, в каждом ряду размещаются десять брусьев $k = 10$. Размеры бруса – $0,1 \times 0,1 \times 2$ м. Плотность древесины ρ составляет 450 кг/м^3 . Определить коэффициент поверхности горения данного штабеля.

Решение.

Удельная массовая скорость выгорания рассчитывается по формуле (2.5).

Изменение массы штабеля за время горения определяется по формуле

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

где η – доля выгоревшей массы штабеля;

V – объем одного бруса, м^3 ;

k – количество брусьев в одном ряду;

n – количество рядов в штабеле.

Подставив численные значения, получается

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

В конструкции штабеля имеются скрытые и открытые поверхности (рис. 2.3).

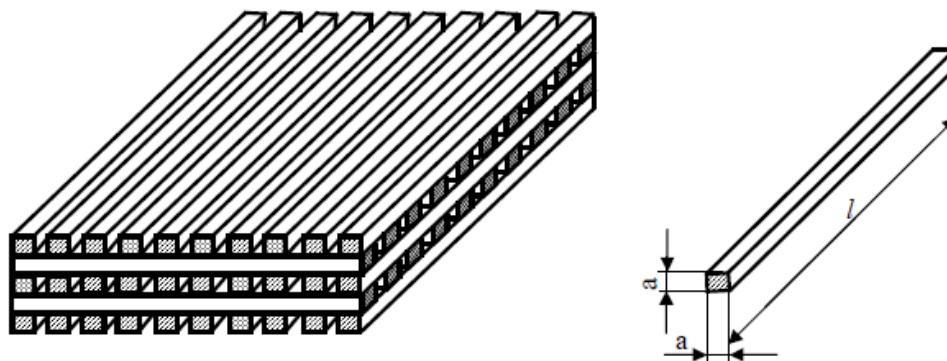


Рис. 2.3. Схема укладки штабеля

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

$$S_{\text{скр}} = a \cdot l \cdot k + 2a^2 \cdot k^2 \cdot (n - 1).$$

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

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

Площадь скрытой поверхности штабеля равна

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

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

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

Абсолютная массовая скорость выгорания определяется по формуле (2.4)

$$v_{\text{м}}^{\text{абс}} = \frac{m}{\tau} = \frac{67,5}{15 \cdot 60} = 0,075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тогда удельная массовая скорость выгорания

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = 0,075 / 31 = 0,0024 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

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

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

Коэффициент поверхности горения штабеля $K_{\text{п}}$ определяется по формуле (2.1):

$$K_{\text{п}} = S_{\text{пг}}/S_{\text{п}} = 31 / 4 = 7,75.$$

Пример 8.

Определить величину пожарной нагрузки и ее теплового эквивалента в помещении площадью 14 м^2 . Пол в помещении выложен деревянным паркетом толщиной $h = 1,5 \text{ см}$. Плотность паркета ρ составляет 450 кг/м^3 . В помещении имеется следующая мебель: деревянные шкаф массой 95 кг ; стол – 35 кг ; два стула по 6 кг каждый; диван массой 100 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.

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

Массу паркета $m_{\text{пар}}$ можно рассчитать, зная плотность ρ и объем V , который можно рассчитать как произведение площади пола на толщину паркета

$$m_{\text{пар}} = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot h,$$
$$m_{\text{пар}} = 450 \cdot 14 \cdot 0,015 = 94,5 \text{ кг}.$$

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

$$m_{\text{древ}} = 0,7 \cdot 100 = 70 \text{ кг};$$
$$m_{\text{ппу}} = 0,20 \cdot 100 = 20 \text{ кг};$$
$$m_{\text{кожи}} = 0,10 \cdot 100 = 10 \text{ кг}.$$

Пожарная нагрузка согласно формуле (2.2) равна

$$P_{\text{пн}} = \frac{94,5 + 95 + 35 + 2 \cdot 6 + 100}{14} = 24,04 \text{ кг/м}^2.$$

Тепловой эквивалент пожарной нагрузки определяется по формуле (2.3)

$$g_{\text{пн}} = \frac{(94,5 + 95 + 35 + 2 \cdot 6 + 70) \cdot 16,5 + 20 \cdot 24,52 + 10 \cdot 21,52}{14} =$$
$$= 411,63 \text{ МДж/м}^2.$$

Пример 9.

В помещении площадью 40 м^2 сложен горючий материал в форме куба. Ребро куба $a = 3 \text{ м}$, плотность материала 450 кг/м^3 , низшая теплота сгорания 25000 кДж/кг , коэффициент полноты сгорания $0,8$. Рассчитать пожарную нагрузку помещения, ее тепловой эквивалент, коэффициент поверхности горения. Определить параметры пожара: абсолютную массовую скорость выгорания, удельную и приведенную скорости выгорания; теплоту пожара, если за 100 мин горения масса материала уменьшилась на 30% .

Решение.

Масса горючего материала

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot a^3 = 450 \cdot 3^3 = 12150 \text{ кг.}$$

Пожарная нагрузка согласно формуле (2.2) равна

$$P_{\text{пн}} = \frac{12150}{40} = 303,75 \text{ кг/м}^2.$$

Тепловой эквивалент пожарной нагрузки определяется по формуле (2.3)

$$g_{\text{пн}} = \frac{12150 \cdot 25}{40} = 7593,75 \text{ МДж/м}^2.$$

Площадь пожара $S_{\text{п}}$ представляет собой площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость и составляет:

$$S_{\text{п}} = a^2.$$

Площадь поверхности горения $S_{\text{пг}} = 5a^2$.

Тогда $K_{\text{п}} = S_{\text{пг}} / S_{\text{п}} = 5 a^2 / a^2 = 5$.

Абсолютная массовая скорость выгорания по формуле (2.4) равна

$$v_{\text{м}}^{\text{абс}} = \frac{\Delta m}{\tau} = \frac{12150 \cdot 0,3}{100 \cdot 60} = 0,6075 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Удельная массовая скорость выгорания по формуле (2.5) равна

$$v_{\text{м}}^{\text{уд}} = v_{\text{м}}^{\text{абс}} / S_{\text{пг}} = 0,6075 / (5 \cdot 3^2) = 0,0135 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Приведенная массовая скорость выгорания по формуле (2.6) равна

$$v_m^{пр} = v_m^{abc} / S_{\Pi} = 0,6075 / 3^2 = 0,0675 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Теплота пожара по формуле (2.7) равна

$$q_{\Pi} = \beta \cdot v_m^{abc} \cdot Q_H = 0,8 \cdot 0,6075 \cdot 25 \cdot 10^6 = 12,15 \cdot 10^6 \text{ Вт}.$$

Задания для самостоятельной работы

1. Найти удельную массовую скорость выгорания керосина в резервуаре, если его уровень за 20 мин горения опустился на 5 см. Плотность керосина $780 \text{ кг}/\text{м}^3$. Рассчитать теплоту пожара, если диаметр резервуара 7 м, коэффициент полноты сгорания 0,8, низшая теплота сгорания $43700 \text{ кДж}/\text{кг}$.

2. На сколько опустится уровень керосина за 30 мин горения в резервуаре? Плотность $780 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельная массовая скорость выгорания равна $0,035 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Рассчитать теплоту пожара, если диаметр резервуара 10 м, коэффициент полноты сгорания 0,85, низшая теплота сгорания $43500 \text{ кДж}/\text{кг}$.

3. За какое время горения уровень нефти в резервуаре опустится на 6 см, если удельная массовая скорость выгорания равна $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а плотность жидкости составляет $900 \text{ кг}/\text{м}^3$? Рассчитать теплоту пожара, если диаметр резервуара 7 м, коэффициент полноты сгорания 0,75, низшая теплота сгорания $43500 \text{ кДж}/\text{кг}$.

4. Определить массу сгоревшего материала и количество тепла, которое выделится на внутреннем пожаре за 30 мин, если площадь поверхности горения составляет 150 м^2 , средний коэффициент поверхности равен 3, удельная массовая скорость выгорания – $0,03 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, низшая теплота сгорания горючего составляет $32 \text{ МДж}/\text{кг}$, коэффициент полноты сгорания – 0,8.

5. В помещении площадью 30 м^2 сложен горючий материал в форме куба. Ребро куба $a = 2 \text{ м}$, плотность материала $300 \text{ кг}/\text{м}^3$, низшая теплота сгорания $40000 \text{ кДж}/\text{кг}$, коэффициент полноты сгорания $\beta = 0,85$. Рассчитать пожарную нагрузку помещения и коэффициент поверхности. Определить параметры пожара: массовую скорость выгорания абсолютную, удельную и приведенную скорости выгорания; теплоту пожара, если за 80 мин горения масса материала уменьшилась на 30 %.

6. Определить время возникновения горения в торговом зале книжного магазина по следующим исходным данным. Пожар ликвидирован в 05 ч 00 мин. Площадь пожара равна площади помещения – 250 м^2 . Масса горючего до пожара 40000 кг. Средняя степень выгорания 30 %. Среднее значение удельной массовой скорости выгорания равно $0,022 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

7. Определить количество тепла, которое выделится на внутреннем пожаре за 20 мин, если площадь поверхности горения составляет 250 м^2 , средний коэффициент поверхности равен 7, приведенная массовая скорость выгорания – $0,008 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, низшая теплота сгорания горючего составляет 22 МДж/кг, коэффициент полноты сгорания – 0,8.

8. Определить величину пожарной нагрузки и ее теплового эквивалента в помещении склада площадью 30 м^2 . Пол в помещении выложен деревянными досками толщиной 3 см. Поверх половых досок настелен линолеум толщиной 3 мм. Плотность линолеума – $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$. На деревянных стеллажах (суммарная масса стеллажей – 180 кг) хранятся изделия из следующих материалов: кожи – 120 кг, ткани – 80 кг, бумаги – 50 кг, резины – 160 кг. Плотность древесины составляет $450 \text{ кг}/\text{м}^3$. Низшая теплота сгорания древесины – 16,5 МДж/кг; линолеума 33,52; кожи – 24,52; ткани – 13,4; бумаги – 14,5 и резины – 33,52 МДж/кг.

9. Рассчитать теплоту пожара при горении жидкости в резервуаре и определить один из параметров, указанных в табл. 2.1.

10. Рассчитать коэффициент поверхности горения и один из параметров открытого пожара штабеля, сложенного из деревянных брусьев. Штабель состоит из n рядов, в каждом ряду размещаются k брусьев. Длина бруса l , сечение a . Плотность древесины составляет ρ . Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Исходные данные

Вар.	Жидкость	Плотность ρ , кг/м ³	Низшая теплота сгорания $Q_{н\gamma}$, кДж/кг	Коэф- фициент полноты сгорания β	Диаметр резер- вуара d , м	Глубина выгора- ния Δh , см	Время выгора- ния τ , мин	Удельная массовая скорость выгора- ния $v_M^{уд}$, кг/(м ² ·с)
1	Ацетон	790	31360	0,93	10	1,5	найти	0,028
2	Мазут	940	41900	0,85	15	найти	15	0,037
3	Керосин	790	43692	0,8	8	2,5	найти	0,042
4	Бензин	800	43580	0,85	6	найти	10	0,035
5	Бутанол	805	36200	0,93	15	2,3	найти	0,027
6	Нефть	920	43600	0,85	10	найти	30	0,023
7	Гептан	684	44919	0,90	8	3,7	найти	0,055
8	Декан	734	44602	0,80	6	найти	25	0,038
9	Бутанол-2	803	36743	0,85	5	5,0	найти	0,045
10	Пропанол-2	784	34139	0,90	8	найти	20	0,040
11	Метанол	787	23839	0,90	7	4,5	найти	0,017
12	Октан	702	44787	0,80	12	найти	5	0,020
13	Пентан	621	45350	0,85	8	5,5	найти	0,053
14	Пропанол-1	801	34405	0,85	10	найти	10	0,034
15	Этанол	785	30562	0,90	5	4,4	найти	0,029
16	Дизельное топливо	790	43419	0,80	6	найти	15	0,038
17	Уайт-спирит	780	43966	0,90	4	2,8	найти	0,055
18	Масло трансформаторное	870	43550	0,87	12	найти	25	0,025
19	Гексан	655	45105	0,83	12	4,8	найти	0,045
20	Гексанол-1	826	39587	0,85	10	найти	25	0,047
21	Изопентан	619	45239	0,90	8	3,0	найти	0,035
22	Акриловая кислота	1051	18000	0,80	12	найти	20	0,048
23	Пентанол	805	34702	0,85	5	2,5	найти	0,045
24	Бензол	874	38519	0,85	4	найти	30	0,014
25	Гексадекан	773	44312	0,9	10	4,0	найти	0,020
26	Этилбензол	863	41323	0,87	8	найти	15	0,022
27	Анилин	1022	32384	0,86	12	2,0	найти	0,033
28	Ксилол	860	52829	0,9	5	найти	10	0,015
29	Нефть	900	42800	0,85	8	найти	20	0,039
30	Керосин тракторный	820	43700	0,85	4	3,5	найти	0,030

Таблица 2.2

Исходные данные

Вар.	Длина бруса l , м	Сечение бруса a , м	Количество рядов n	Количество брусьев k	Плотность древесины ρ , кг/м ³	Выгорающая масса Δm , кг	Время горения τ , мин	Удельная массовая скорость выгорания $v_m^{пр}$, кг/(м ² ·с)
1	1,4	0,15	10	6	450	найти	6	0,001
2	1,7	0,2	9	7	430	35	найти	0,004
3	0,8	0,1	10	4	410	30	8	найти
4	1,9	0,2	8	5	400	26	найти	0,007
5	1,0	0,15	6	10	420	найти	12	0,001
6	1,2	0,2	7	8	440	25	найти	0,008
7	1,6	0,1	5	7	400	15	10	найти
8	1,1	0,15	8	5	440	23	найти	0,008
9	1,5	0,2	10	6	450	найти	5	0,005
10	2,0	0,15	3	10	500	20	найти	0,004
11	0,9	0,1	6	8	510	найти	10	0,003
12	1,1	0,1	3	8	400	25	найти	0,006
13	1,5	0,2	4	10	420	34	7	найти
14	2,0	0,15	7	5	440	33	найти	0,0075
15	0,9	0,2	5	4	460	найти	13	0,001
16	1,3	0,1	6	7	480	27	найти	0,007
17	1,8	0,15	8	6	500	18	9	найти
18	1,4	0,2	10	9	490	23	найти	0,009
19	1,7	0,1	9	6	470	найти	7	0,003
20	0,8	0,2	10	7	450	19	найти	0,006
21	1,9	0,15	8	4	430	найти	9	0,002
22	1,0	0,2	6	5	410	25	найти	0,007
23	1,2	0,1	7	10	400	40	12	найти
24	1,6	0,15	4	8	420	18	найти	0,008
25	1,1	0,2	3	10	440	найти	15	0,002
26	1,5	0,1	4	5	460	30	найти	0,019
27	2,0	0,2	7	4	480	20	8	найти
28	0,9	0,15	5	7	500	найти	10	0,016
29	1,3	0,2	6	6	490	26	найти	0,015
30	1,8	0,1	8	9	470	24	14	найти

3. РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ПОЖАРА В УСЛОВИЯХ НЕОГРАНИЧЕННОГО ГАЗООБМЕНА

В настоящее время около 90 % пожаров во всем мире происходит внутри различных помещений. Такие пожары наносят наибольший суммарный социальный, экономический и экологический ущерб. На пожарах в помещениях ежегодно погибает больше людей, чем в различных войнах и вооруженных конфликтах. Расчет показывает, что при горении мебели в квартире на рядовом пожаре, который имеет среднестатистическую площадь около 5 м^2 , среднеобъемную температуру $500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$, за время свободного развития (около 20 мин) в окружающую среду выбрасывается $500\text{--}900 \text{ м}^3$ продуктов горения. В их состав входит, как известно, целая гамма вредных и отравляющих веществ.

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

Условные обозначения:

∇ – место возникновения пожара;

τ – время, мин;

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

L_{τ} – путь, пройденный фронтом пламени к моменту времени τ , м;

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

При расчете площади пожара принимается ряд допущений.

Первое: пожарная нагрузка в помещении однородна и распределена равномерно по всей площади пола. Это означает, что распространение фронта пламени происходит непрерывно.

Второе: газообмен не влияет на скорость и направление распространения пожара, т.е. пожар регулируется нагрузкой.

Третье: фронт пламени распространяется во все стороны и с одинаковой скоростью. Следовательно, площадь пожара может иметь форму круга, полукруга, четверти круга, сектора, прямоугольника или квадрата (рис. 3.1).

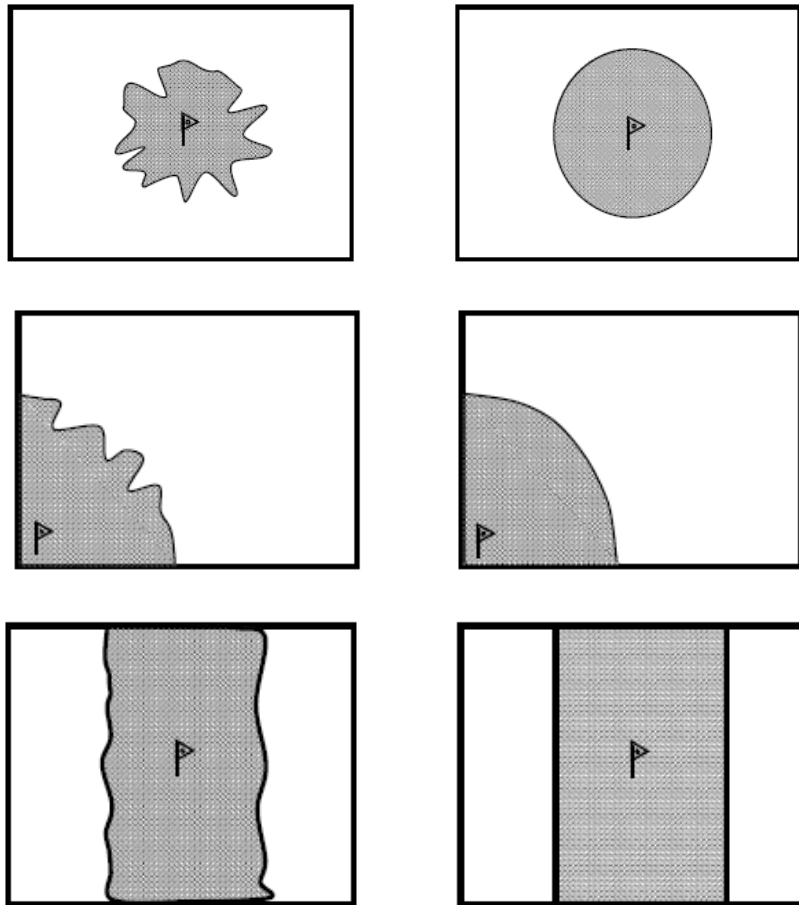


Рис. 3.1. Приведение площади пожара к правильной геометрической форме

Четвертое: в первые 10 мин свободного развития пожара его линейная скорость $v_{\text{л}}$ равна половине значения, указанного в прил. 2 для соответствующего объекта:

$$\text{при } \tau \leq 10 \text{ мин } v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл.}};$$

$$\text{при } \tau > 10 \text{ мин } v_{\text{л}} = v_{\text{л}}^{\text{табл.}}.$$

Пятое: когда фронт пламени достигает ограждающей конструкции, он принимает форму прямоугольника.

Учитывая, что на начальной стадии развития пожара (длительность которой принимается равной 10 мин) $v_{\text{л}} = 0,5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}}$ (м/мин) путь L_{τ} (м), пройденный фронтом пламени к моменту τ , будет равен:

$$\text{при } \tau \leq 10 \text{ мин } L_{\tau} = 0,5 v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot \tau, \quad (3.1)$$

$$\text{при } \tau > 10 \text{ мин } L_{\tau} = L_{10} + L_{\tau-10}, \quad (3.2)$$

где L_{10} – путь, пройденный фронтом пламени за первые 10 мин;

$$L_{10} = 0,5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} ; \quad (3.3)$$

$L_{\tau-10}$ – путь, пройденный фронтом пламени за время, оставшееся после 10 мин,

$$L_{\tau-10} = v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot (\tau - 10). \quad (3.4)$$

Тогда при $\tau > 10$ мин

$$L_{\tau} = L_{10} + L_{\tau-10} = 5v_{\text{л}}^{\text{табл}} + v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot (\tau - 10) \quad (3.5)$$

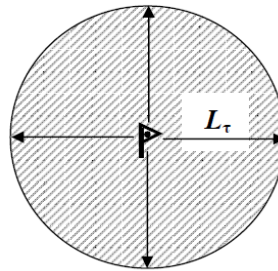
$$\text{или } L_{\tau} = v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot (\tau - 5) \quad (3.6)$$

Усредненные значения линейной скорости ($v_{\text{л}}^{\text{табл}}$) для разных объектов приведены в табл. 3.1.

Площадь пожара $S_{\text{п}}$ в каждый из моментов времени рассчитывается по основным формулам:

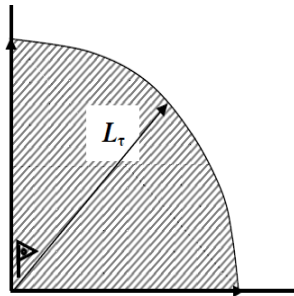
1. Круговая форма пожара

$$S_{\text{п}} = \pi \cdot L_{\tau}^2$$



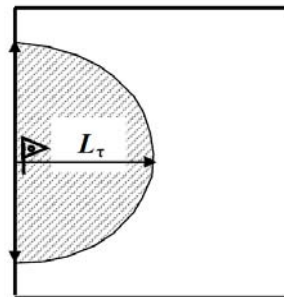
2. Угловая форма пожара

$$S_{\text{п}} = 0,25 \pi \cdot L_{\tau}^2$$



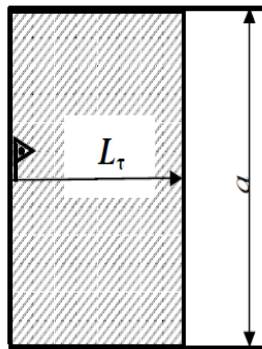
3. Полуциркуговая форма пожара (пожар, возникший возле стены)

$$S_{\text{п}} = 0,5 \pi \cdot L_{\tau}^2$$



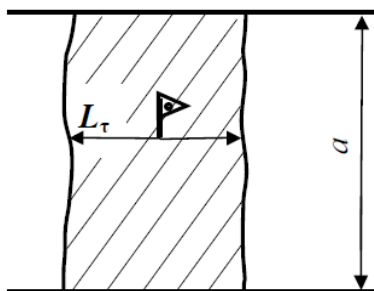
4. Односторонняя прямоугольная форма пожара

$$S_{\Pi} = a \cdot L_{\tau}$$



5. Двусторонняя прямоугольная форма пожара

$$S_{\Pi} = 2 a \cdot L_{\tau}$$



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

По значениям S_{Π}^{τ} в масштабе строится зависимость $S_{\Pi}^{\tau} = f(\tau)$, которая называется *графиком изменения площади пожара*, или *графиком распространения пожара в помещении*.

Последовательность расчета площади пожара в помещении:

- 1) нарисовать план помещения и отметить на нем место возникновения пожара;
- 2) найти L по формулам (3.1)–(3.6);
- 3) на плане помещения отложить L_{τ} ; установить, где будет находиться фронт пламени, указать значение τ ;
- 4) учитывая, что при достижении ограждающих конструкций фронт пламени спрямляется, определить форму полученной геометрической фигуры;
- 5) найти площадь пожара в соответствии с планом помещения.

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

- 1) нарисовать план помещения с указанием на нем места 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 $V_{\text{п}} = 0,5 v_{\text{л}}^{\text{табл.}}$;
- 4) найти расстояние L_{τ} до первой опорной точки и найти время τ , за которое это расстояние будет пройдено;
- 5) определить $S_{\text{п}}^{\tau}$ по описанной выше схеме;
- 6) повторить расчеты для всех остальных опорных точек;
- 7) построить план и график распространения пожара.

Пример 1.

Рассчитать площадь пожара в помещении на 5-й, 10-й, 15-й и 20-й минутах с момента его возникновения, и время полного охвата помещения пламенем (рис. 3.2), если скорость распространения пожара 1 м/мин. Предел огнестойкости двери – 10 минут. Пожар возник возле двери.

Решение.

1. Пожар возник возле двери, следовательно, отсчет предела огнестойкости начнется с первой минуты пожара. В правое помещение пожар проникнет через 10 минут с момента возгорания. До 10-й минуты пожар развивается только в одном направлении.

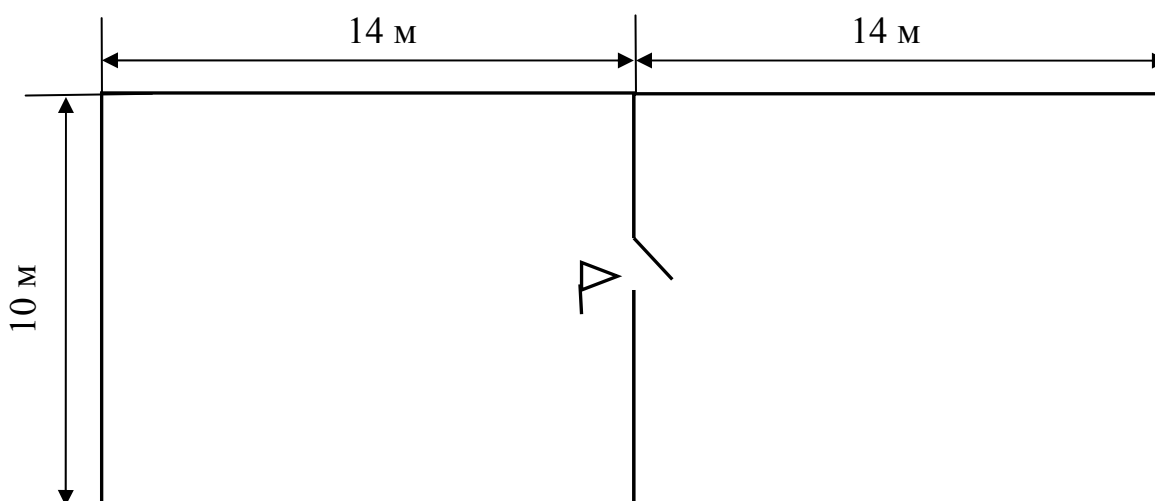


Рис. 3.2. План помещения и место возникновения пожара

2. Расстояние, пройденное огнем за 5 минут:

$$L_5 = 0,5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot \tau = 0,5 \cdot 1 \cdot 5 = 2,5 \text{ м.}$$

До ближайших стен – 5 м, следовательно, на 5-й минуте фронт пламени будет иметь форму полукруга (рис. 3.3).

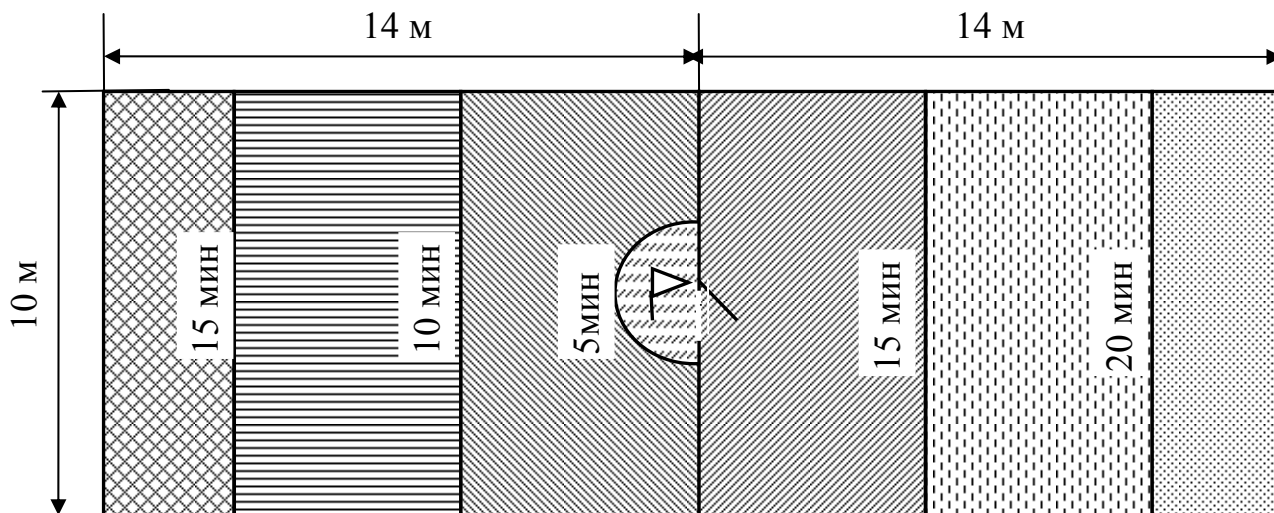


Рис. 3.3. План распространения пожара

Площадь пожара на 5-й минуте:

$$S_{\text{п}}^5 = 3,14 \cdot 2,5^2 / 2 = 9,81 \text{ м}^2.$$

3. На 10-й минуте расстояние, пройденное огнем:

$$L_{10} = 5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 5 \cdot 1 = 5 \text{ м.}$$

В левом помещении фронт пламени достиг боковых стен и принял форму прямоугольника размером 5×10 м и площадью $S_{\text{п}}^{10} = 50 \text{ м}^2$.

4. За 15 минут фронт пламени может пройти расстояние:

$$L_{15} = L_{10} + L_{\tau-10} = 5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} + v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot (\tau - 10) = v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot (\tau - 5) = 1 \cdot (15 - 5) = 10 \text{ м.}$$

Площадь составит: $S_1 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ м}^2$.

В смежном помещении фронт пламени будет распространяться всего $15 - 10 = 5$ минут, причем его скорость равна $v_{\text{л}}^{\text{табл}}$, поскольку $\tau > 10$ минут.

Расстояние, пройденное фронтом пламени в правом помещении за 5 минут составит $1 \cdot 5 = 5 \text{ м}$.

Следовательно, площадь пожара в этом помещении $S_2 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ м}^2$.

Общая площадь пожара:

$$S_{\text{п}}^{15} = S_1 + S_2 = 150 \text{ м}^2.$$

5. К 20-й минуте фронт пламени может пройти расстояние:

$$L_{20} = 1 \cdot (20 - 5) = 15 \text{ м}.$$

Все левое помещение к этому моменту времени будет охвачено пожаром.

В правом помещении пожар будет распространяться $20 - 10 = 10$ минут.

Расстояние $10 \cdot 1 = 10 \text{ м}$.

В результате площадь пожара:

$$S_{\text{п}}^{20} = 10 \cdot 14 + 10 \cdot 10 = 240 \text{ м}^2.$$

Полный охват всего помещения наступит, когда фронт пламени пройдет оставшиеся $14 - 10 = 4 \text{ м}$. При скорости 1 м/мин это произойдет через: $4/1 = 4$ минуты. Расчетное время охвата всего помещения составляет $20 + 4 = 24$ минуты. Тогда, $S_{\text{п}}^{24} = 280 \text{ м}^2$.

Итак, $S_{\text{п}}^5 = 9,81 \text{ м}^2$; $S_{\text{п}}^{10} = 50 \text{ м}^2$; $S_{\text{п}}^{15} = 150 \text{ м}^2$, $S_{\text{п}}^{20} = 240 \text{ м}^2$, $S_{\text{п}}^{24} = 280 \text{ м}^2$. По полученным данным строится график распространения пожара (рис. 3.4).

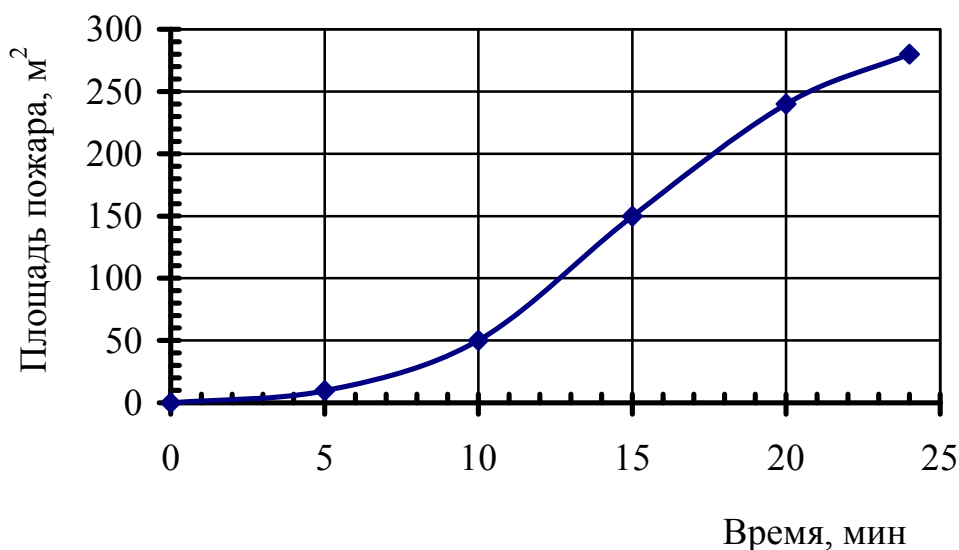


Рис. 3.4. График распространения пожара

Пример 2.

Построить график распространения пожара в помещении размерами 8×10 м. Табличное значение линейной скорости составляет 1,1 м/мин, очаг возгорания находится в левом нижнем углу (рис. 3.5).

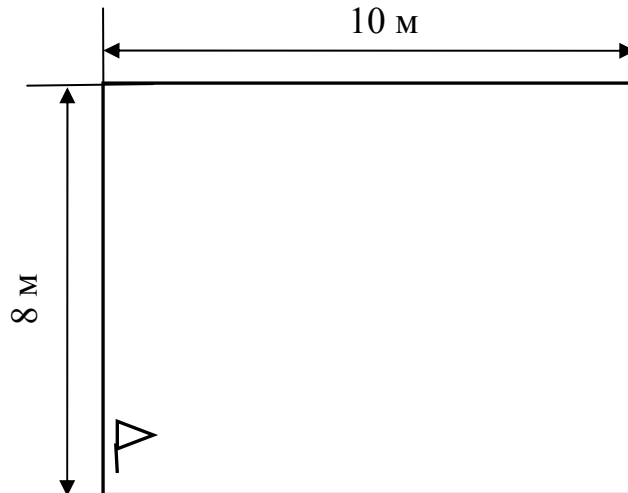


Рис. 3.5. План помещения и место возникновения пожара

Решение.

1. За первые десять минут фронт пламени пройдет расстояние

$$L_{10} = 0,5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5 v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 5 \cdot 1,1 = 5,5 \text{ м.}$$

Так как это расстояние меньше, чем длина торцевой стены, площадь пожара на 10-й минуте будет иметь форму сектора радиусом 5,5 м (рис. 3.6).

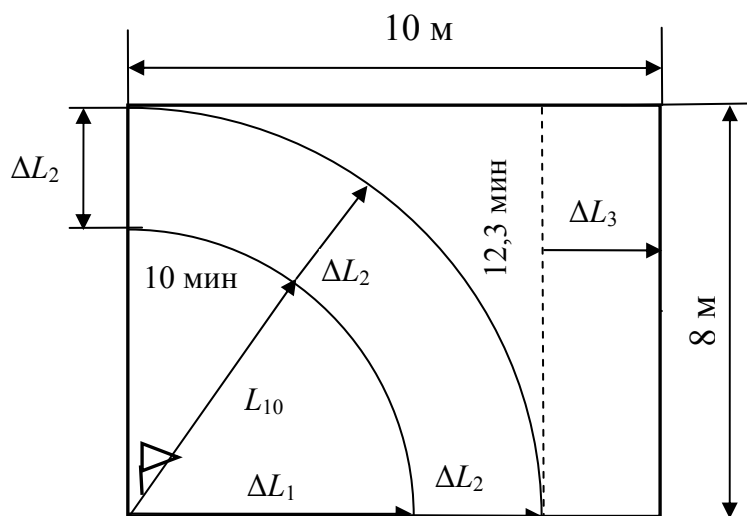


Рис. 3.6. План распространения пожара

Площадь данного сектора равна

$$S_{\Pi}^{10} = \pi L_{10}^2 / 4 = 3,14 \cdot 5,5^2 / 4 = 23,75 \text{ м}^2.$$

2. Оставшееся расстояние до продольной стены

$$\Delta L_2 = 8 - 5,5 = 2,5 \text{ м.}$$

На этом и всех последующих участках пути $v_{\Pi} = v_{\Pi}^{\text{табл}} = 1 \text{ м/мин.}$

Время $\Delta\tau_2$, за которое пожар преодолеет расстояние ΔL_2 , составит:

$$\Delta\tau_2 = \Delta L_2 / v_{\Pi}^{\text{табл}} = 2,5 / 1,1 = 2,3 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара

$$\tau = 10 + 2,3 = 12,3 \text{ мин.}$$

Путь фронта пламени $L_{12,3} = 8 \text{ м.}$

Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь $S_{\Pi}^{12,3}$ рассчитывается как площадь квадрата (см. рис. 3.6):

$$S_{\Pi}^{12,3} = 8 \cdot 8 = 48 \text{ м}^2.$$

3. Из плана пожара (см. рис. 3.6) видно, что до противоположной торцевой стены остается расстояние ΔL_3 :

$$\Delta L_3 = 10 - 8 = 2 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время

$$\Delta\tau_3 = \Delta L_3 / v_{\Pi}^{\text{табл}} = 2 / 1,1 = 1,8 \text{ мин.}$$

Общее время составит $\tau = 12,3 + 1,8 = 14,1 \text{ мин.}$ К этому моменту пожар охватит всю площадь помещения

$$S_{\Pi}^{14,1} = 8 \cdot 10 = 80 \text{ м}^2.$$

Готовый план и график распространения пожара показаны на рис. 3.7 и 3.8.

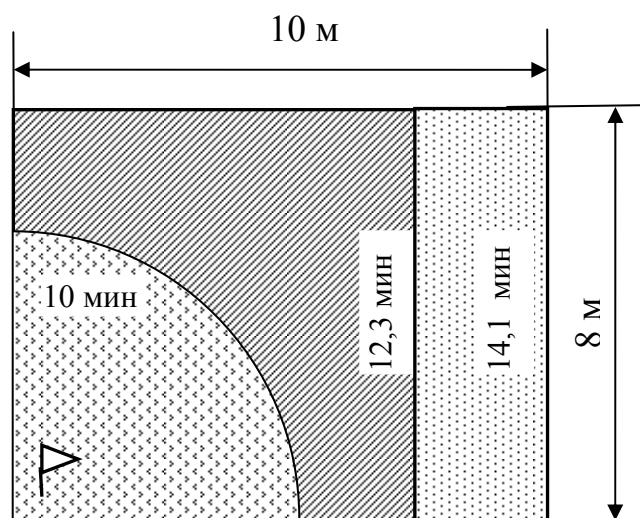


Рис. 3.7. План распространения пожара

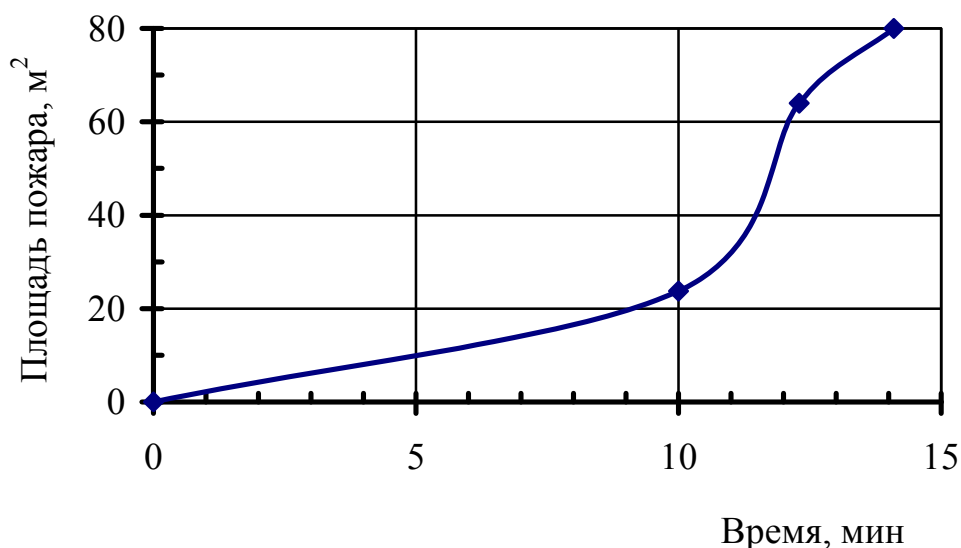


Рис. 3.8. График распространения пожара

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. 3.9). Очаг возгорания находится возле центра торцевой стены левого помещения. Линейная скорость распространения равна 0,5 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 20 мин.

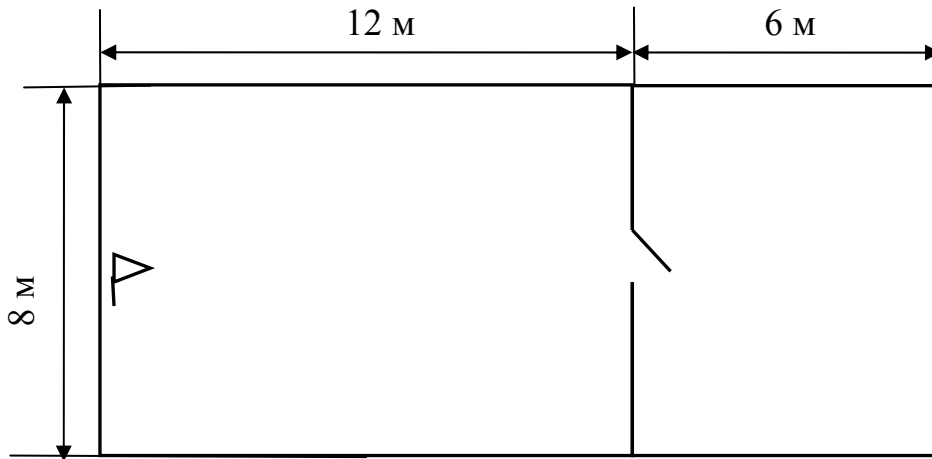


Рис. 3.9. План помещения и место возникновения пожара

Решение.

1. За первые десять минут фронт пламени пройдет расстояние

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

Так как это расстояние меньше, чем половина длины торцевой стены, площадь пожара на 10-й минуте будет иметь форму полукруга радиусом 2,5 м (рис. 3.10). Площадь данного сектора равна

$$S_{\text{п}}^{10} = \pi \cdot L_{10}^2 / 2 = 3,14 \cdot 2,5^2 / 2 = 9,8 \text{ м}^2.$$

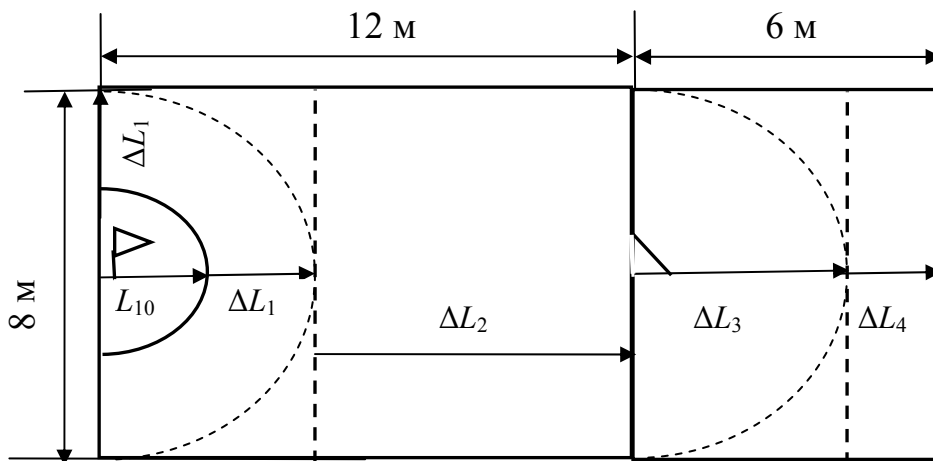


Рис. 3.10. Рабочий вариант плана распространения пожара

2. Оставшееся расстояние до продольной стены

$$\Delta L_1 = 4 - 2,5 = 1,5 \text{ м.}$$

На этом и всех последующих участках пути $v_{\text{л}} = v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 0,5 \text{ м/мин.}$

Время $\Delta\tau_1$, за которое пожар преодолеет расстояние ΔL_1 , составит:

$$\Delta\tau_1 = \Delta L_1 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 1,5 / 0,5 = 3 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара $\tau = 10 + 3 = 13 \text{ мин.}$ Путь фронта пламени $L_{13} = 4 \text{ м.}$

Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь $S_{\text{п}}^{13}$ рассчитывается как площадь прямоугольника (см. рис. 3.10):

$$S_{\text{п}}^{13} = 8 \cdot 4 = 32 \text{ м}^2.$$

3. Из плана пожара (см. рис. 3.10) видно, что до перегородки остается расстояние

$$\Delta L_2 = 12 - 4 = 8 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время

$$\Delta\tau_2 = \Delta L_2 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 8 / 0,5 = 16 \text{ мин.}$$

Время распространения составит

$$\tau = 13 + 16 = 29 \text{ мин.}$$

К этому моменту пожар охватит всю левую часть помещения:

$$S_{\text{п}}^{29} = 8 \cdot 12 = 96 \text{ м}^2.$$

4. Предел огнестойкости двери 10 мин. В этот промежуток времени площадь пожара будет неизменной.

Рост площади пожара продолжится через $29 + 20 = 49 \text{ мин.}$

Поэтому $S_{\text{п}}^{29} = S_{\text{п}}^{49} = 96 \text{ м}^2.$

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

Расстояние от центра двери до ближайшей стены $\Delta L_3 = 8/2 = 4$ м. Фронт пламени его пройдет за время $\Delta \tau_3$:

$$\Delta \tau_3 = \Delta L_3 / v_{\text{д}}^{\text{табл}} = 4 / 0,5 = 8 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара $\tau = 49 + 8 = 57$ мин. Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь в данной части помещения

$$\Delta S_3 = 8 \cdot \Delta L_3 = 8 \cdot 4 = 32 \text{ м}^2.$$

Площадь пожара на данный момент времени (рис. 3.12)

$$S_{\text{п}}^{57} = 96 + 32 = 128 \text{ м}^2.$$

6. Из плана пожара (см. рис. 3.10) видно, что до правой торцевой стены остается расстояние

$$\Delta L_4 = 6 - 4 = 2 \text{ м.}$$

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

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

Общее время составит $\tau = 57 + 4 = 61$ мин.

К этому моменту пожар охватит всю площадь помещения:

$$S_{\text{п}}^{61} = 8 \cdot (12+6) = 144 \text{ м}^2.$$

Готовый план и график распространения пожара показаны на рис. 3.11 и 3.12.

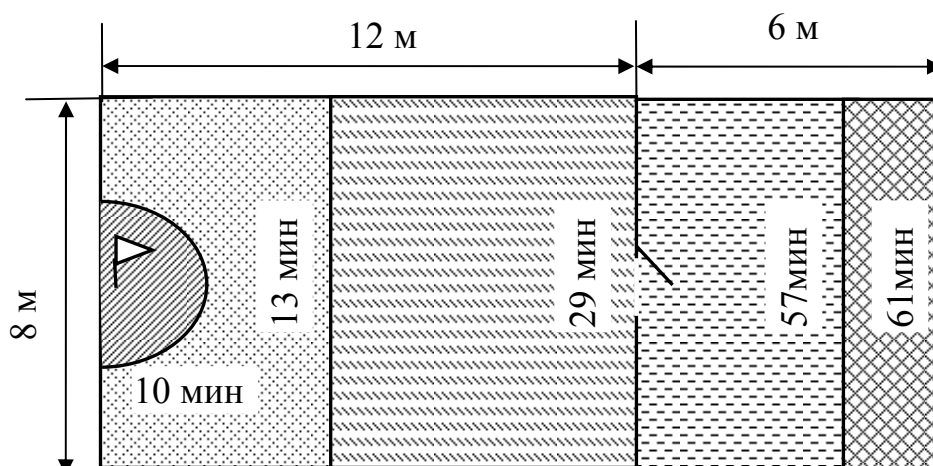


Рис. 3.11. План распространения пожара

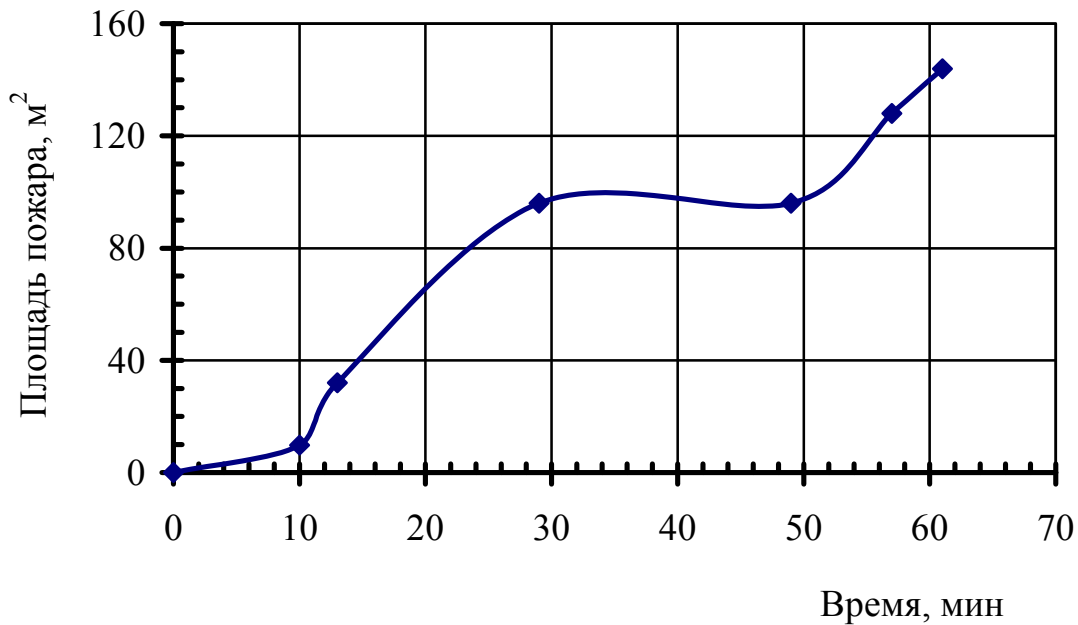


Рис. 3.12. График распространения пожара

Пример 4.

Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом. Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане (рис. 3.13). Очаг возгорания находится в углу левой части помещения. Линейная скорость распространения равна 1 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 15 мин.

Решение.

1. За первые десять минут фронт пламени пройдет расстояние

$$L_{10} = 0,5 v_{\text{л}}^{\text{табл}} \cdot 10 = 5 \cdot v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 5 \cdot 1 = 5 \text{ м.}$$

Так как это расстояние меньше, чем длины торцевой стены (6 м), площадь пожара на 10-й минуте будет иметь угловую форму радиусом 2,5 м (рис. 3.14). Площадь данного сектора равна

$$S_{\text{п}}^{10} = \pi \cdot L_{10}^2 / 4 = 3,14 \cdot 5^2 / 4 = 19,6 \text{ м}^2.$$

2. Оставшееся расстояние до продольной стены

$$\Delta L_1 = 6 - 5 = 1 \text{ м.}$$

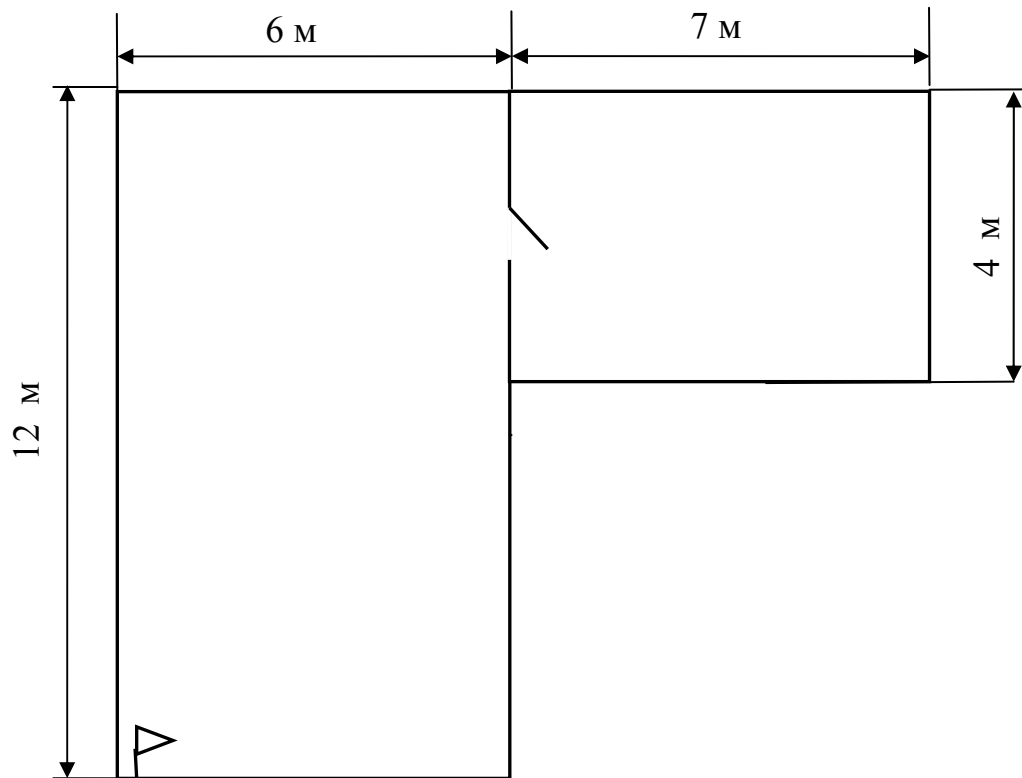


Рис. 3.13. План помещения и место возникновения пожара

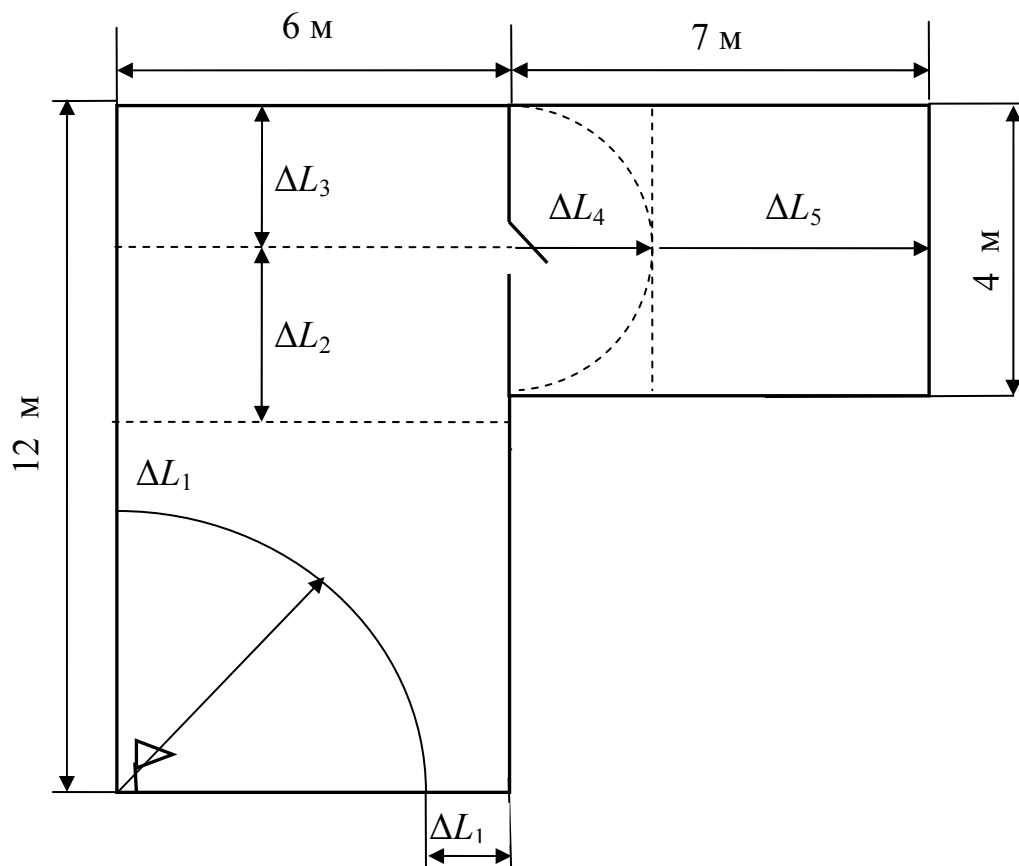


Рис. 3.14. Рабочий вариант плана распространения пожара

На этом и всех последующих участках пути $v_{\text{л}} = v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 1$ м/мин.

Время $\Delta\tau_1$, за которое пожар преодолеет расстояние ΔL_1 , составит:

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

Время распространения пожара $\tau = 10 + 1 = 11$ мин. Путь фронта пламени $L_{13} = 6$ м.

Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь $S_{\text{п}}^{11}$ рассчитывается как площадь квадрата (рис. 3.15):

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

3. Из рабочего плана пожара (см. рис. 3.14) видно, что до двери в правую часть помещения остается расстояние

$$\Delta L_2 = (12 - 4/2) - 6 = 4 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время

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

Время распространения пожара составит $\tau = 11 + 4 = 15$ мин. Площадь пожара на 15-й минуте равна

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

4. До противоположной стены осталось расстояние

$$\Delta L_3 = 12 - 10 = 2 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время

$$\Delta\tau_3 = \Delta L_3 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 2 / 1 = 2 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара составит $\tau = 15 + 2 = 17$ мин.

К этому моменту пожар охватит всю левую часть помещения:

$$S_{\text{п}}^{17} = 12 \cdot 6 = 72 \text{ м}^2.$$

5. Предел огнестойкости двери 15 мин. В течение $15 - 2 = 13$ мин времени площадь пожара будет неизменной.

Рост площади пожара продолжится через $17 + 13 = 30$ мин.

Поэтому $S_{\text{п}}^{17} = S_{\text{п}}^{30} = 72 \text{ м}^2$.

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

Расстояние от центра двери до ближайшей стены $\Delta L_4 = 4/2 = 2$ м. Фронт пламени его пройдет за время $\Delta\tau_4$:

$$\Delta\tau_4 = \Delta L_4 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 2 / 1 = 2 \text{ мин.}$$

Время распространения пожара $\tau = 30 + 2 = 32$ мин. Так как фронт пламени в этот момент достигает ограждающей конструкции, он спрямляется, и его площадь в данной части помещения

$$\Delta S_4 = 4 \cdot \Delta L_4 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ м}^2.$$

Площадь пожара на данный момент времени (рис. 3.15)

$$S_{\text{п}}^{32} = 72 + 8 = 80 \text{ м}^2.$$

7. Из рабочего плана развития пожара (см. рис. 3.14) видно, что до правой торцевой стены остается расстояние

$$\Delta L_5 = 7 - 2 = 5 \text{ м.}$$

Это расстояние фронт пламени преодолеет за время $\Delta\tau_5$:

$$\Delta\tau_5 = \Delta L_5 / v_{\text{л}}^{\text{табл}} = 5 / 1 = 5 \text{ мин.}$$

Общее время составит $\tau = 32 + 5 = 37$ мин.

К этому моменту пожар охватит всю площадь помещения:

$$S_{\text{п}}^{37} = 12 \cdot 6 + 7 \cdot 4 = 100 \text{ м}^2.$$

Готовый план и график распространения пожара показаны на рис. 3.15 и 3.16.

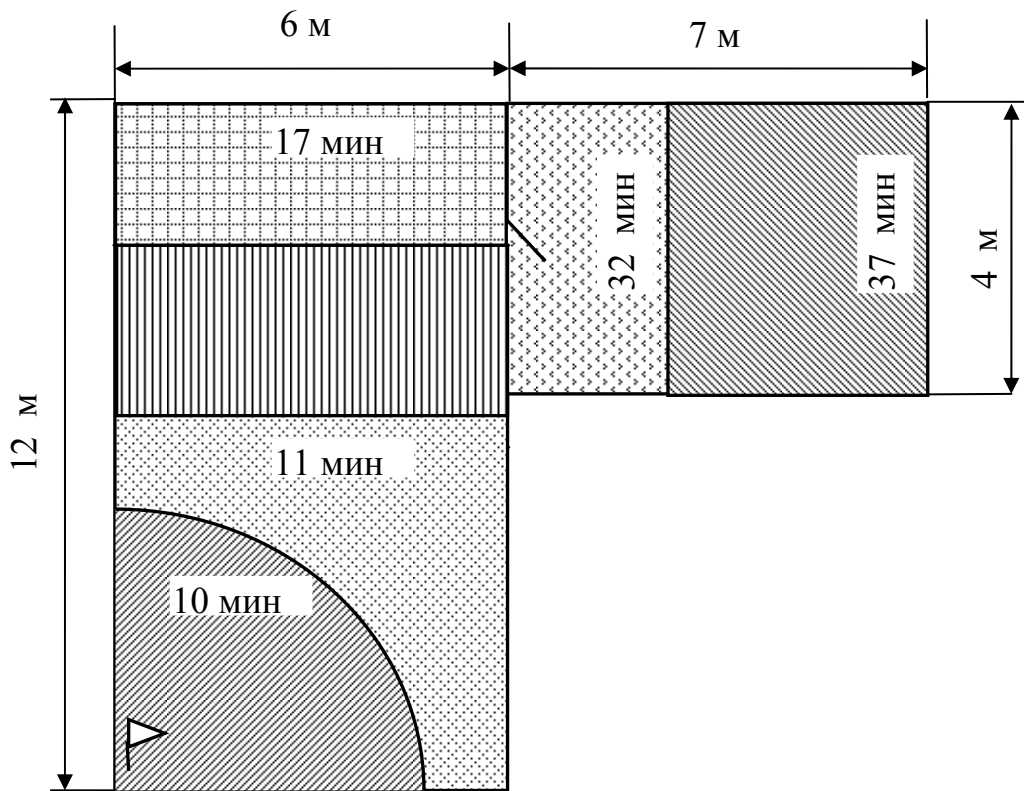


Рис. 3.15. План распространения пожара

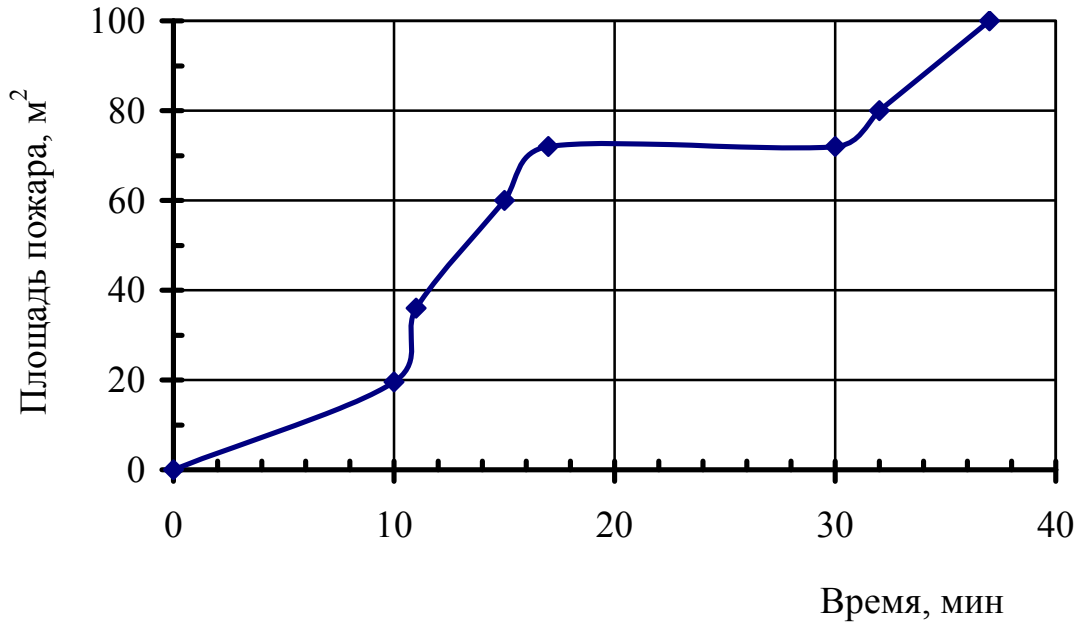


Рис. 3.16. График распространения пожара

Задания для самостоятельной работы

1. Построить план и график распространения пожара в помещении размерами 12×15 м, если линейная скорость составляет $1,5$ м/мин, очаг возгорания находится в центре (рис. 3.17).

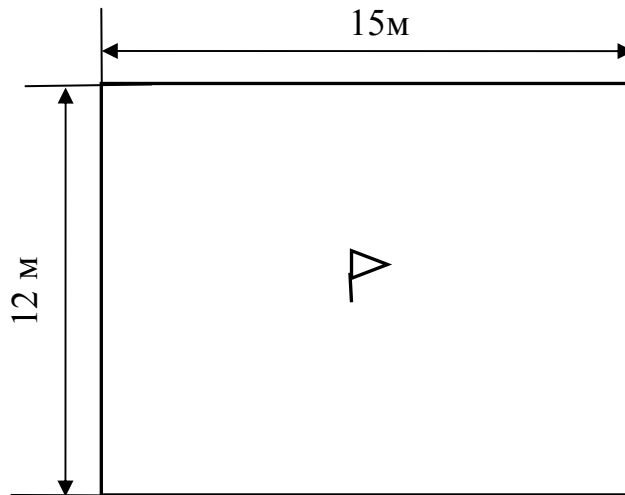


Рис. 3.17. План помещения

2. Рассчитать площадь пожара на 5-й, 12-й и 15-й минутах с момента его возникновения и время охвата пламенем всего помещения, если скорость распространения равна $0,8$ м/мин. Очаг возгорания находится в правом верхнем углу (рис. 3.18).

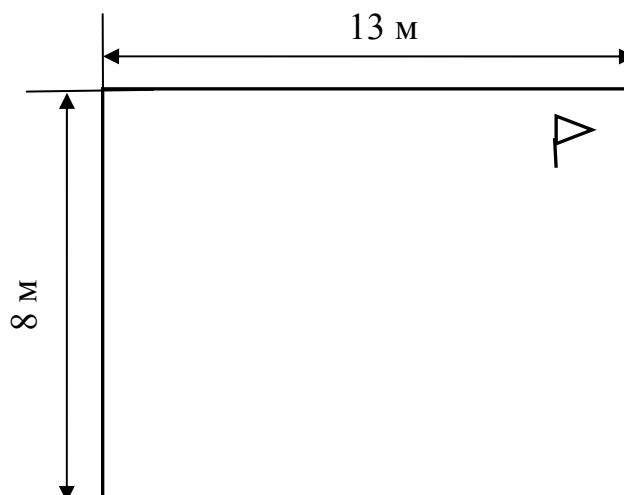


Рис. 3.18. План помещения

3. Построить план и график распространения пожара в помещении размерами 9×12 м, если скорость распространения равна 1 м/мин. Очаг возгорания находится в центре правой торцевой стены (рис. 3.19).

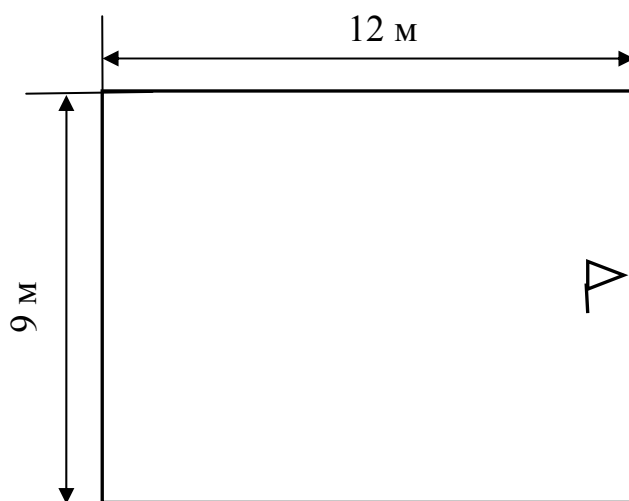


Рис. 3.19. План помещения

4. Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом (рис. 3.20). Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане. Очаг возгорания находится в углу правой части помещения. Линейная скорость распространения равна $0,75$ м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 15 мин.

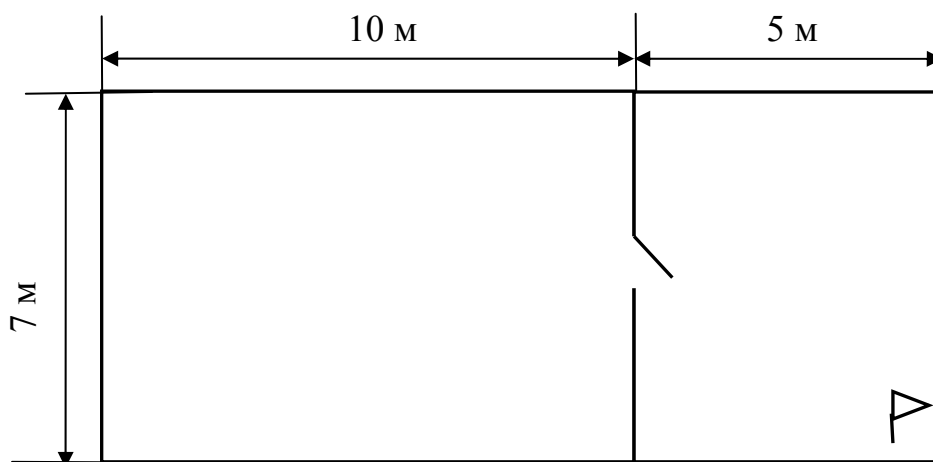


Рис. 3.20. План помещения

5. Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом (рис. 3.21). Дверь расположена посередине перегородки. Размеры

помещения указаны на плане. Очаг возгорания находится в углу правой части помещения. Линейная скорость распространения равна 1,2 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 10 мин.

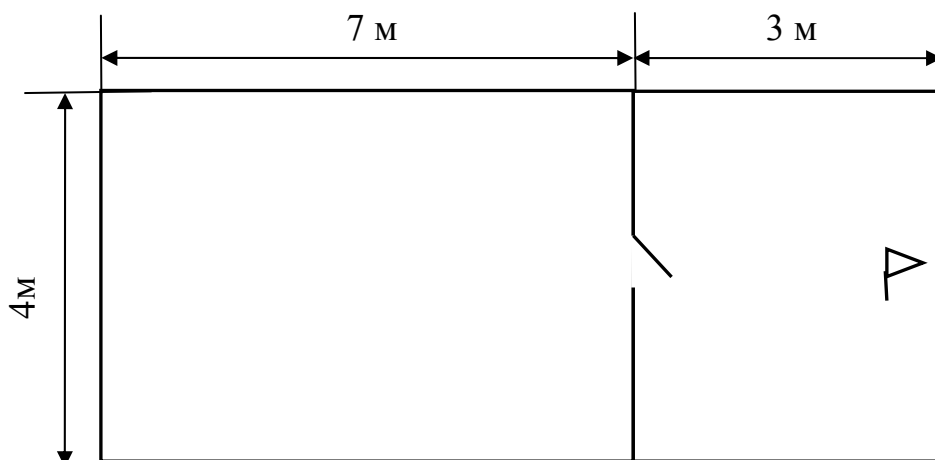


Рис. 3.21. План помещения

6. Построить план и график распространения пожара в помещении, разделенном перегородкой с дверным проемом (рис. 3.22). Дверь расположена посередине перегородки. Размеры помещения указаны на плане. Очаг возгорания находится в углу левой части помещения. Линейная скорость распространения равна 1,1 м/мин. Предел огнестойкости двери составляет 8 мин.

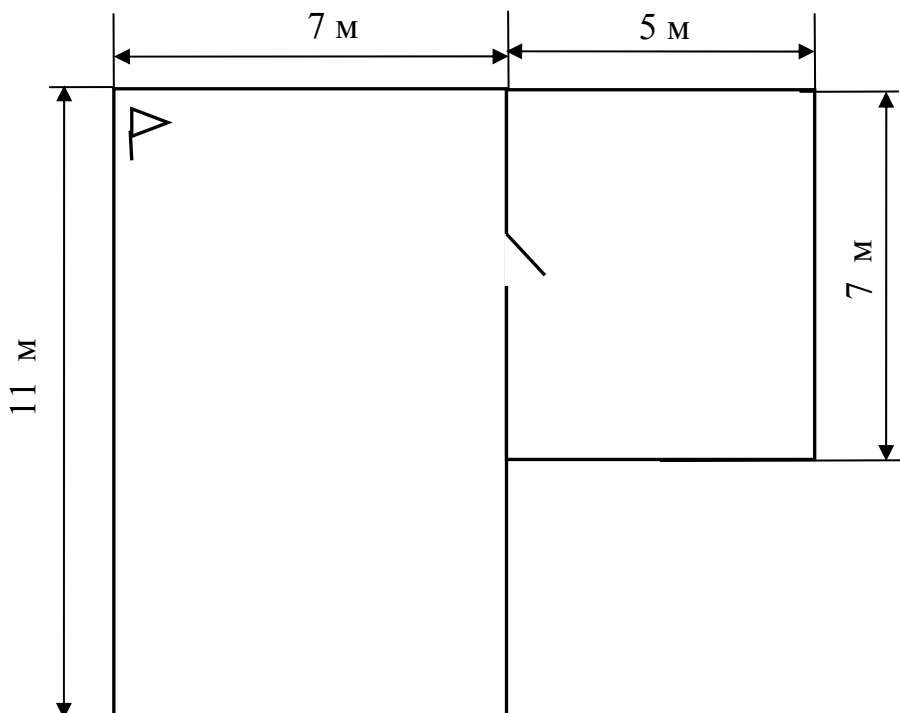


Рис. 3.22. План помещения

7. Построить план и график распространения пожара в помещении (рис. 3.23). Определить время полного охвата пожаром помещения. Размеры комнат помещения, табличная линейная скорость $v_{л}^{табл}$, предел огнестойкости двери, очаг возгорания приведены в табл. 3.1.

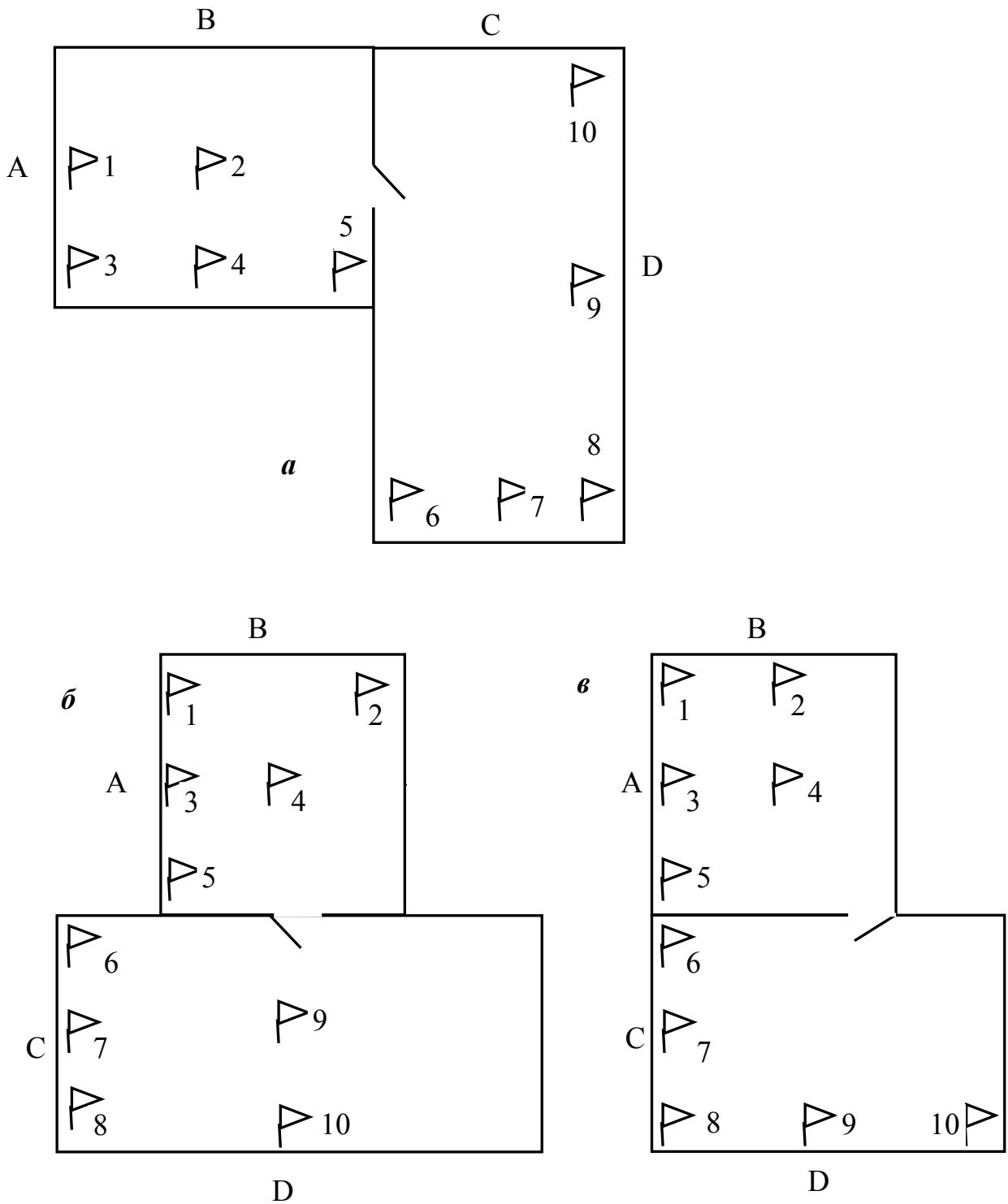


Рис. 3.23. Планы помещений

Таблица 3.1

Параметры помещения, табличная линейная скорость,
предел огнестойкости двери и местоположение очага возгорания

Вар.	Рисунок	Положение очага	$v_{\text{л}}^{\text{табл}}$, м/мин	A, м	B, м	C, м	D, м	Предел огнестойкости двери, мин
1	а	1	0,6	5	6	5	10	10
2		3	0,5	6	7	5	9	15
3		2	0,4	5	8	6	10	12
4		5	0,4	8	8	6	8	26
5		6	1,0	5	6	7	7	23
6		4	0,5	7	7	7	14	14
7		7	0,6	7	8	8	12	31
8		8	0,5	6	8	7	14	17
9		9	1,0	5	6	5	10	32
10		10	0,8	8	8	6	12	35
11	б	1	0,6	6	5	5	10	27
12		3	0,5	7	6	6	9	11
13		2	0,4	8	5	8	12	34
14		5	0,4	8	8	6	10	24
15		6	1,0	6	5	7	16	16
16		4	0,5	7	7	8	14	33
17		7	0,6	8	7	7	12	22
18		8	0,5	8	6	5	10	28
19		9	1,0	6	5	8	16	18
20		10	0,8	8	10	6	14	38
21	в	1	0,6	5	6	5	10	19
22		3	0,5	6	7	5	9	37
23		2	0,4	5	8	6	10	20
24		5	0,4	8	8	6	8	29
25		6	1,0	5	6	7	7	36
26		4	0,5	7	7	7	14	13
27		7	0,6	7	8	8	12	25
28		8	0,5	6	8	7	14	21
29		9	1,0	5	6	5	10	30
30		10	0,8	8	8	6	12	22

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО САМОВОЗГОРАНИЯ

Температура самонагревания – самая низкая температура вещества, при которой самопроизвольный процесс нагревания приводит к тлению или пламенному горению. Это самая низкая температура, при которой в материале фиксируется экзотермический процесс в условиях эксперимента.

Самонагревание веществ, находящихся в атмосфере воздуха, обычно обусловлено происходящими в них химическими или физическими процессами, выделяющими тепло: окисления, разложения, адсорбции и т.д.

Температуру самонагревания твердых (неплавких) материалов определяют в термостате, в котором образец материала можно выдерживать при заданной температуре длительное время. За температуру самонагревания принимают минимальную температуру термостата, при которой наблюдается резкое повышение температуры материала, заканчивающееся тлением или горением.

Температура самонагревания многих самовозгорающихся материалов равна или ниже обычной температуры в помещениях, т.е. ниже 17–25 °С.

Как фактор пожарной опасности температура самонагревания считается минимальной температурой, при которой возможно тепловое самовозгорание материала в наиболее благоприятных условиях для возникновения горения.

Склонность твердых материалов к тепловому самовозгоранию определяется рядом показателей пожарной опасности, зависящих от физической структуры материалов, их массы, объема и условий окружающей среды. Показатели пожарной опасности связаны между собой строгой закономерностью, определяющей способность материала к тепловому самовозгоранию в определенных условиях.

В качестве первого показателя представлена *минимальная температура среды*, при которой возможно самовозгорание определенного объема вещества.

Вторым показателем является *время* с того момента, когда температура всего материала станет равной минимальной температуре окружающей среды, до момента наступления самовозгорания.

Третий показатель – *удельная поверхность* самонагревающегося материала, которая определяется размерами и формой материала. Зная этот показатель, можно определить безопасные размеры материалов и их геометрическую форму для данной температуры среды.

Для определения склонности веществ и материалов к самовозгоранию применяют эмпирический метод. Этот метод позволяет простым и достаточно надежным путем устанавливать связь между температурой окружающей среды, удельной поверхностью материала и временем для его самовозгорания. Указанные зависимости имеют следующий вид:

$$\lg t_c = A_p + n_p \lg S; \quad (4.1)$$

$$\lg t_c = A_B - n_B \lg \tau, \quad (4.2)$$

где t_c – минимальная температура среды, при которой происходит тепловое самовозгорание, °С;

τ – время с момента полного прогревания образца до момента его самовозгорания, ч;

A_p, A_B, n_p, n_B – эмпирические постоянные коэффициенты;

S – удельная поверхность образца (м^{-1}) определяемая из выражения

$$S = \frac{F}{V}, \quad (4.3)$$

где F – площадь наружной поверхности образца, м^2 ;

V – объем образца, м^3 .

Общий вид приведенных зависимостей показан на рис. 4.1.

В прил. 3 приведены значения констант A_p, A_B, n_p, n_B для некоторых горючих материалов [4, 10].

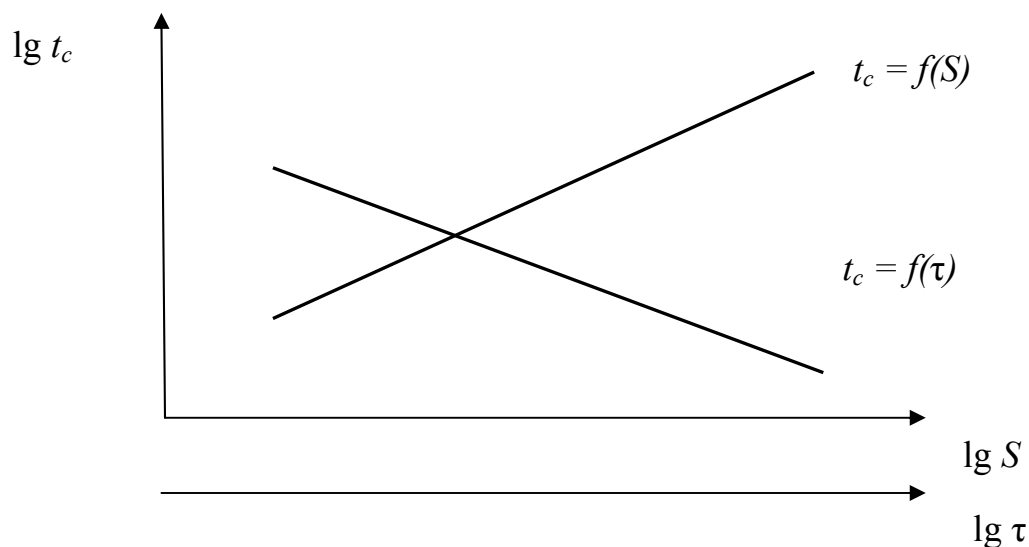


Рис. 4.1. Общий вид зависимостей t_c от S и τ

По формуле (4.1) с достаточной для практики точностью можно приближенно определить температуру тления (самовоспламенения). Для этого в формулу $t_c = f(S)$ подставляют величину удельной поверхности образца S , равную 150 м^{-1} . Эта величина соответствует удельной поверхности образца, применяемого при определении температуры тления по методике ВНИИПО. Тогда формула принимает вид:

$$\begin{aligned} \lg t_{\text{тл}} &= A_p + n_p \cdot \lg 150; \\ \lg t_{\text{тл}} &= A_p + 2,18 \cdot n_p. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Аналогичным образом определяется температура самовоспламенения:

$$\lg t_{\text{св}} = A_p + 2,18 \cdot n_p. \quad (4.5)$$

Рассчитанные по формулам (4.4) и (4.5) температуры тления и самовоспламенения фактически равны минимальной температуре окружающей среды, при которой произошло самовозгорание образца с удельной поверхностью 150 м^{-1} с периодом индукции, близким к нулю.

По формуле (4.1), выражающей зависимость $t_c = f(S)$, можно вычислить также температуру самонагрева. Для этого нужно подставить в формулу величину удельной поверхности образца S , равную 1 м^{-1} , тогда формула принимает вид:

$$\lg t_{\text{сн}} = A_p. \quad (4.6)$$

Величина удельной поверхности $S = 1 \text{ м}^{-1}$ соответствует очень большому объему материала. Считается, что при температуре ниже $t_{\text{сн}}$ тепловое самовозгорание невозможно для любого по величине объема материала.

Пример 1.

Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания кипы сена размером

а) $0,8 \times 0,8 \times 0,8 \text{ м}$; б) $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ м}$.

Решение.

Температура тления рассчитывается по формуле (4.4)

$$\lg t_{\text{тл}} = 2,103 + 2,18 \cdot 0,109 = 2,34;$$

$$t_{\text{тл}} = 218,9 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Температура самонагревания рассчитывается по формуле (4.6)

$$\lg t_{\text{сн}} = 2,103 \text{ или } t_{\text{сн}} = 126,8 \text{ }^\circ\text{С}$$

а. Рассчитывается удельная поверхность кипы сена по формуле (4.3).

Определяется вначале наружная поверхность кипы F (м^2). Кипа сена представляет собой куб, поверхность одной стороны куба равна $0,8^2 = 0,64 \text{ м}^2$, поверхность всего куба $F = 6 \cdot 0,64 = 3,84 \text{ м}^2$.

Объем кипы сена равен $V = 0,8^3 = 0,512 \text{ м}^3$.

Следовательно,

$$S = \frac{3,84}{0,512} = 7,5 \text{ м}^{-1}.$$

Далее по формуле (4.1) с учетом констант из табл. прил. 3 определяется минимальная температура среды, при которой происходит тепловое самовозгорание сена:

$$\lg t_c = 2,103 + 0,109 \cdot \lg 7,5 = 2,198;$$

$$t_c = 158 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Определяется время с момента полного прогревания кипы сена до температуры 158°C (до момента самовозгорания):

$$\lg 158 = 2,311 - 0,058 \cdot \lg \tau;$$

$$\tau = 86 \text{ часов.}$$

б. Наружная поверхность кипы F (м²)

$$F = 6 \cdot 1,5^2 = 13,5 \text{ м}^2.$$

Объем кипы сена равен $V = 1,5^3 = 3,375 \text{ м}^3$.

Следовательно,

$$S = \frac{13,5}{3,375} = 4 \text{ м}^{-1}.$$

Минимальная температура среды, при которой происходит тепловое самовозгорание сена:

$$\lg t_c = 2,103 + 0,109 \cdot \lg 4 = 2,159;$$

$$t_c = 147 \text{ °C.}$$

Время с момента полного прогревания кипы сена до температуры 147 °C (до момента самовозгорания):

$$\lg 147 = 2,311 - 0,058 \cdot \lg \tau;$$

$$\tau = 300 \text{ часов.}$$

Пример 2.

Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха и время нагрева при самовозгорании порошка бутилксантогената калия. Образец имеет форму куба объемом 1 м³ (насыпная масса порошка 460 кг/м³).

Решение.

Минимальная температура окружающей среды при самовозгорании порошка бутилового ксантогената определяется по формуле (4.1) (с учетом констант см. табл. прил. 3)

$$\lg t_c = 1,853 + 0,133 \cdot \lg S.$$

Для куба со стороной, равной 1 м, удельная поверхность равна

$$S = \frac{F}{V} = \frac{6}{1} = 6 \text{ м}^{-1}.$$

Минимальная температура среды при самовозгорании составит:

$$\lg t_c = 1,853 + 0,133 \cdot \lg 6 = 1,853 + 0,133 \cdot 0,778 = 1,957;$$

$$t_c = 90,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Время выдержки до момента самовозгорания продукта объемом 1 м³ находится по формуле:

$$\lg t_c = 2,196 - 0,132 \cdot \lg \tau ;$$

$$0,132 \cdot \lg \tau = 2,196 - \lg t_c = 2,196 - 1,957 = 0,239;$$

$$\lg \tau = \frac{0,239}{0,132} = 1,81;$$

$$\tau = 64,5 \text{ часа}.$$

Пример 3.

Рассчитать показатели пожарной опасности от самовозгорания порошка нигрозина спирторастворимого. Объем максимально возможного количества данного порошка в аппарате имеет коническую форму (рис. 4.2).

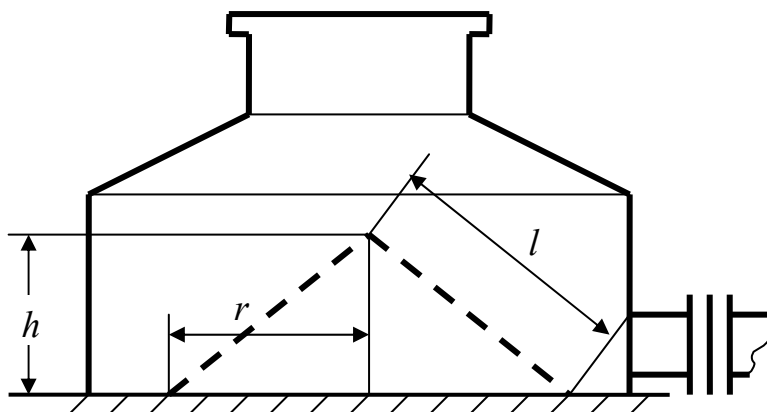


Рис. 4.2. К расчету показателей пожарной опасности от теплового самовозгорания порошка нигрозина спирторастворимого в производственном аппарате

Высота конуса $h = 1,0$ м, радиус основания $r = 1,5$ м. Нижняя стенка (днище) аппарата имеет хорошую теплоизоляцию, затрудняющую теплообмен с внешней средой. Боковые стены конуса окружены воздухом, находящимся в спокойном состоянии.

Требуется определить: минимальную температуру в аппарате, при которой данный объем порошка самовозгорается; время с начала засыпки и образования скопления в виде конуса до момента самовозгорания; температуру тления; безопасную температуру в аппарате.

Решение.

1. Условия теплового самовозгорания порошка нигрозина спирторастворимого выражаются следующими формулами (с учетом констант табл. прил. 3):

$$\lg t_c = 1,708 + 0,220 \cdot \lg S;$$

$$\lg t_c = 2,254 - 0,260 \cdot \lg \tau,$$

2. При определении удельной поверхности объема порошка нигрозина спирторастворимого в аппарате, поверхность, которая соприкасается с днищем аппарата, исключается, так как считается, что данная поверхность полностью теплоизолирована и не принимает участия в теплообмене.

Тогда площадь поверхности:

$$F = \pi \cdot r \cdot l = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 1,8 = 8,478 \text{ м}^2.$$

Объем порошка нигрозина:

$$l = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{1,0^2 + 1,5^2} = \sqrt{3,25} = 1,8 \text{ м};$$

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 1,5^2 \cdot 1,0 \approx 2,322 \text{ м}^3.$$

Удельная поверхность порошка:

$$S = \frac{8,478}{2,322} \approx 3,65 \text{ м}^{-1}.$$

3. Определяется минимальная температура среды для данного объема порошка с удельной поверхностью $S = 3,65 \text{ м}^{-1}$:

$$\lg t_c = 1,708 + 0,220 \cdot \lg S = 1,708 + 0,220 \cdot 0,5623;$$

$$\lg t_c = 1,832, \quad t_c = 68 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Определяется время до момента самовозгорания τ :

$$\lg t_c = 2,254 - 0,260 \cdot \lg \tau;$$

$$1,832 = 2,254 - 0,260 \cdot \lg \tau;$$

$$\lg \tau = \frac{2,254 - 1,832}{0,260} = \frac{0,422}{0,260} \approx 1,623,$$

$$\tau = 41,98 \approx 42 \text{ часа}.$$

5. Приближенное значение температуры тления находится по формуле (4.4).

Для данного порошка ($A_p = 1,708$, $n_p = 0,220$) эта формула примет вид:

$$\lg t_{\text{тл}} = 1,708 + 2,18 \cdot 0,220 = 2,188;$$

$$t_{\text{тл}} = 154 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Приближенная температура самонагрева порошка

$$\lg t_{\text{сн}} = A_p = 1,708. \quad t_{\text{сн}} = 51 \text{ }^\circ\text{C}.$$

За безопасную температуру принимается температура, составляющая не более 90 % от температуры самонагрева. Таким образом, безопасная температура в аппарате равна $t = 51 \cdot 0,9 = 46 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задания для самостоятельной работы

1. Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха и время нагрева при самовозгорании порошка азопигмента бордо ЖВ. Образец имеет форму куба с ребром 60 см.

2. Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагрева кипы хлопка размером $75 \times 75 \times 75$ см.

3. Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха, время нагрева, температуру тления, температуру

самонагревания при самовозгорании фрезерного торфа. Образец имеет форму куба с ребром 80 см.

4. Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания кипы сосновых опилок размером $50 \times 100 \times 150$ см.

5. Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания при самовозгорании порошка витамина В2. Образец имеет форму куба с ребром 65 см.

6. Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания торфяной плиты размером $80 \times 120 \times 120$ см.

7. Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания кипы сена размером $120 \times 150 \times 180$ см.

8. Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания при самовозгорании порошка диспергатора НФ. Образец имеет форму куба с ребром 70 см.

9. Рассчитать минимальную температуру окружающего воздуха, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания при самовозгорании порошка красителя дисперсного бордо 2 с. Образец имеет размеры $40 \times 45 \times 50$ см.

10. Определить температуру окружающего воздуха при самовозгорании, время нагрева, температуру тления, температуру самонагревания при самовозгорании горючего материала X. Образец имеет форму куба с ребром a м. Исходные данные, необходимые для расчета, приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Исходные данные

Вар.	Горючий материал X	a, м
1	Опилки сосновые	0,7
2	Плита торфяная	0,75
3	Сено	0,9
4	Солома пшеничная	0,85
5	Хлопок	0,9
6	Торф фрезерный	0,95
7	Мука ржаная	1,0
8	Лигнин	1,15
9	Ледерин	1,2
10	Ионообменная смола СГ №30	1,25
11	Диспергатор НФ	0,7
12	Бутиловый ксантогенат калия	0,75
13	Полинак	0,8
14	Товарные дрожжи	0,85
15	Витамин В ₂	0,9
16	Полимицин	0,95
17	Изип	1,0
18	Кормарин	1,15
19	Фитобактериомицин	1,2
20	Дисперсный алый Ж	1,25
21	Дисперсный бордо 2с	0,7
22	Дисперсный красно-коричневый	0,75
23	Дисперсный фиолетовый 4к	0,8
24	Азопигмент желтый светопроочный 23В	0,85
25	Азопигмент бордо ЖВ	0,9
26	Азопигмент ярко-красный ЖВ	0,95
27	Нигрозин спирторастворимый	1,0
28	Кислотный фиолетовый С	1,15
29	Цианол голубой 4 «З»	1,2
30	Кубозоль «Серый С»	1,25

5. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Температура самовоспламенения – наименьшая температура системы, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермической реакции, приводящее к появлению пламенного горения.

Из-за сложностей прямого измерения температуры самовоспламенения газов и паров, за нее принимают минимальную температуру стенки реакционного сосуда, при которой наблюдают самовоспламенение. Эта температура зависит от условий теплообмена как внутри реакционного сосуда, так и самого сосуда с окружающей средой, объема смеси, а также каталитической активности стенки сосуда и ряда других параметров.

Показатель применяется для определения допустимой температуры нагревания горючих веществ, электрического и технологического оборудования.

Температура самовоспламенения $T_{\text{св}}$, приведенная в справочниках, получена экспериментально по стандартной методике для горючей смеси стехиометрического состава. Установлено, что в пределах гомологического ряда величина $T_{\text{св}}$ является функцией длины углеродной цепи в молекуле. Чем длиннее цепь, тем ниже температура самовоспламенения. Метод расчета $T_{\text{св}}$ основан на эмпирической зависимости $T_{\text{св}}$ от средней длины углеродной цепи.

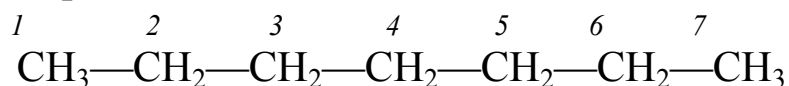
Метод пригоден для расчета $T_{\text{св}}$ алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов.

Задача состоит в том, чтобы по структурной формуле химического соединения найти для него среднюю длину углеродных цепей.

Углеродная цепь – цепочка атомов углерода от одного конца молекулы до другого.

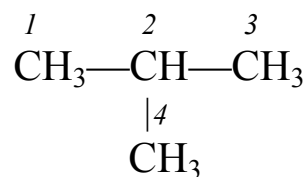
Длина цепи – число атомов углерода в такой цепи.

Например, в нормальном гептане



одна углеродная цепь и ее длина равна 7.

В изобутане



три цепи с одинаковой длиной (1–2–3, 1–2–4 и 3–2–4), длина каждой цепи равна 3. Средняя длина углеродных цепей в этом соединении тоже равна 3.

Определяется средняя длина цепи, далее по табл. прил. 4 находится $T_{\text{св}}$.

Например, для н-гептана $T_{\text{св}} = 496$ К, а для изобутана $T_{\text{св}} = 743$ К.

В молекуле химического соединения со сложной структурой бывает трудно сразу найти все углеродные цепи.

Расчет температуры воспламенения проводится в следующей последовательности.

1. Определяется количество углеродных цепей m :

$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2}, \quad (5.1)$$

где M_p – количество функциональных групп в молекуле горючего вещества: $-\text{CH}_3$, $-\text{OH}$, фенильная группа может быть как концевой, так и в середине цепи.

2. Определяется длина каждой цепи (количество атомов углерода) и средняя длина цепи $l_{\text{ср}}$:

$$l_{\text{ср}} = \frac{\sum m_i \cdot C_i}{m}, \quad (5.2)$$

где C_i – число атомов углерода в цепи;

m_i – число цепей с C_i .

При определении C_i надо иметь в виду, что гидроксильная группа $-\text{OH}$ удлиняет цепь, а фенильная группа уменьшает ее на один атом углерода.

3. По табл. прил. 4 по средней длине цепи определяется температура самовоспламенения.

При определении числа цепей и их длины в молекуле ароматического соединения следует иметь в виду следующие правила:

1. Фенил (бензольное кольцо), находящийся внутри углеродной цепи, считается и как концевой.

2. При определении углеродной цепи атомы углерода в бензольном кольце в расчет не принимаются.

3. Фенил, находящийся в углеродной цепи, укорачивает ее на единицу.

Температуру самовоспламенения $t_{св}$, °С, также можно рассчитать по формулам:

$$t_{св} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{ср}} \quad \text{при } l_{ср} \leq 5; \quad (5.3)$$

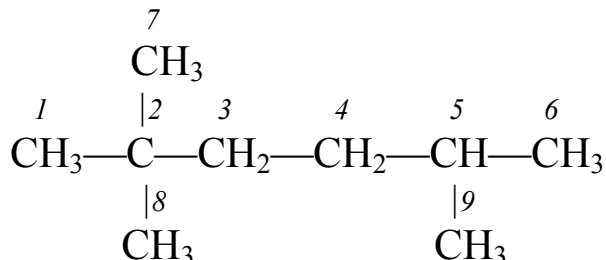
$$t_{св} = 300 - 38\sqrt{l_{ср} - 5} \quad \text{при } l_{ср} > 5 \quad (5.4)$$

Пример 1.

Рассчитать температуру самовоспламенения 2,2,5-триметилгексана.

Решение.

1. Записывается структурная формула горючего вещества и определяется количество цепей



Количество функциональных групп $M_p = 5$, так как в молекуле содержится пять групп $-\text{CH}_3$. Тогда по формуле (5.1) количество углеродных цепей равно

$$m = \frac{5(5-1)}{2} = 10.$$

2. Находится длина каждой из цепей и средняя длина по формуле (5.2).

m_i	1-6	1-7	1-8	1-9	7-6	7-8	7-9	8-6	8-9	6-9
C_i	6	3	3	6	6	3	6	6	6	3

2. По табл. прил. 4 температура самовоспламенения равна 706 К или 433 °С.

3. Так как $l_{cp} < 5$, то температура самовоспламенения находится по формуле (5.3)

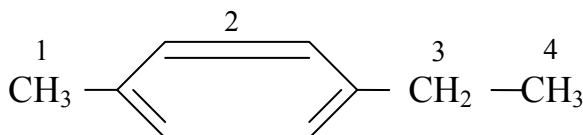
$$t_{cb} = 300 + 116\sqrt{5-3} = 464 \text{ °С.}$$

Согласно справочным данным [5, С. 576] температура самовоспламенения равна 430 °С.

Пример 3. Определить температуру самовоспламенения 1-метил-4-этилбензола.

Решение.

1. Структурная формула вещества:



Количество функциональных групп $M_p = 3$, так как в молекуле две метильные и одна фенильная группы.

2. Определяется длина цепей.

m_i	1-4	1-2	2-4
C_i	2 (3-1)	0 (1-1)	1 (2-1)

Длина цепи уменьшается на один атом углерода, так как в нее входит фенильная группа:

$$l_{cp} = \frac{1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{3} = 1,0.$$

3. По табл. прил. 4 температура самовоспламенения равна 712 К или 439 °С.

4. Так как $l_{cp} < 5$, то температура самовоспламенения находится по формуле (5.3)

$$t_{cb} = 300 + 116\sqrt{5-1} = 532 \text{ °С.}$$

Согласно справочным данным [6, С. 732] температура самовоспламенения равна 475 °С.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить температуру самовоспламенения этана, бутана, гексана, октана, декана. Построить график зависимости температуры самовоспламенения от их положения в гомологическом ряду.

2. Рассчитать температуру самовоспламенения нормального бутанола-1, бутанола-2 и 2-метилбутанола-2. Сделать выводы о влиянии разветвления углеродной цепи на температуру самовоспламенения.

3. Рассчитать температуру самовоспламенения толуола и 1,4-диэтилбензола и сделать вывод о влиянии длины боковой цепи на сравнительную пожарную опасность ароматических соединений.

4. Рассчитать температуру самовоспламенения октана, октанола-1, этилбензола и сделать вывод о влиянии строения веществ на их сравнительную пожарную опасность.

5. Рассчитать температуру самовоспламенения веществ, приведенных в табл. 5.1 двумя способами. Сравнить полученные значения со справочными данными.

Таблица 5.1

Исходные данные

Вар.	Вещества	
1	2	
1	2,2,3-триметилбутан	1,2-диметилбензол
2	2,2,3,3-тетраметилбутан	1,3-диметилбензол
3	2,2,3-триметилпентан	1,4-диметилбензол
4	2,2,4-триметилпентан	1,2,3-триметилбензол
5	2,3,3-триметилпентан	1,2,4-триметилбензол
6	2,3,4-триметилпентан	1,3,5-триметилбензол
7	2,2,3-триметилгексан	1-метил-2-этилбензол
8	2,3,3-триметилгексан	1,3-диметил-4-пропилбензол
9	2,3,4-триметилгексан	1-метил-2-этил-4-пропилбензол
10	2,3,5-триметилгексан	1,2-диметил-4-этилбензол
11	2,2,5-триметилгексан	1,4-диэтилбензол

<i>1</i>	<i>2</i>	
12	2-метил-3-этилгексан	1,2-диэтилбензол
13	2-метил-4-этилгексан	1,3-диэтилбензол
14	2,3-диметил-3-этилгексан	1,3-диметил-4-этилбензол
15	2,2-диметил-4-этилгексан	1-метил-2-этил-3-пропилбензол
16	2,3-диметил-4-этилгексан	1,2-диметилбутанол-1
17	2,4-диметил-3-этилгексан	1,3-диметилбутанол-1
18	2,4,4-триметилгептан	2,2-диметилбутанол-1
19	2,2,5-триметилгептан	2,3-диметилбутанол-2
20	2-метил-4-этилгептан	3,3-диметилпентанол-1
21	4-метил-4-этилгептан	2,3-диметилпентанол-1
22	2,3,4-триметилгептан	2,2-диметилпентанол-1
23	2,4,4-триметилгептан	2,3-диметилпентанол-2
24	2,2,3-триметиллоктан	3,3-диметилпентанол-2
25	2,4,5-триметиллоктан	3-метил-2-этилпентанол-1
26	2,3,4-триметиллоктан	3,3-диметилгептанол-1
27	2,4,6-триметилнонан	2,2-диэтилгексанол-1
28	2,3,5-триметилнонан	4,4-диэтилоктанол-2
29	2,2,5-триметилдекан	3-метил-2-этилгексанол-1
30	2,4,5-триметилдекан	2,3-диэтилгептанол-1

6. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения (НКПВ, ВКПВ) – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно зажигание смеси и распространение пламени на любое расстояние от источника зажигания. Обычно выражаются они в объемных процентах. Концентрационные пределы зависят не только от природы вещества, но и от температуры, давления и других факторов.

Расчет концентрационных пределов воспламенения для индивидуальных компонентов.

Концентрационные пределы воспламенения $\varphi_{п}$ для индивидуальных горючих компонентов можно вычислить по формуле

$$\varphi_{п} = \frac{100}{a\beta + b} \% \text{ об.}, \quad (6.1)$$

где β – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции горения (число молекул кислорода, необходимое для сгорания одной молекулы вещества);

a и b – эмпирические константы, приведенные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Значения констант a и b для расчета концентрационных пределов воспламенения по формуле (6.1)

Концентрационные пределы воспламенения	Константы	
	a	b
Нижний предел	8,684	4,679
Верхний предел		
при $\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
при $\beta > 7,5$	0,768	6,554

Величина β определяется по уравнению реакции горения или по формуле

$$\beta = m_C + m_S + \frac{m_H - m_X}{4} - \frac{m_O}{2}, \quad (6.2)$$

где m_C, m_S, m_H, m_O, m_X – количество в молекуле горючего компонента атомов углерода, серы, водорода, кислорода и галогенов.

Нижний концентрационный предел воспламенения φ_H веществ, молекулы которых состоят из атомов C, H, O, N, S, Si, P, F и Cl, может быть вычислен по формуле:

$$\varphi_H = \frac{100}{1 + h_{\text{обр}} \cdot \Delta H_{\text{обр}}^0 + \sum_{j=1}^l (h_j \cdot m_j)}, \quad (6.3)$$

где $h_{\text{обр}}$ – коэффициент при теплоте образования газа, моль/кДж;

$\Delta H_{\text{обр}}^0$ – стандартная теплота образования вещества в газообразном состоянии при 25 °С, кДж/моль;

h_j – коэффициент j -го элемента. Значения коэффициентов h_j приведены в табл. 6.2;

m_j – число атомов j -го элемента в молекуле.

Относительная средняя квадратичная погрешность расчета по формуле (6.3) составляет 8 %.

Таблица 6.2

Значение коэффициентов h_j и $h_{\text{обр}}$ для расчета нижнего концентрационного предела воспламенения

h_j	Значение	h_j	Значение
h_C	3,929	h_{Si}	34,352
h_H	4,476	h_P	27,944
h_O	-0,522	h_F	5,283
h_N	-0,494	h_{Cl}	-1,767
h_S	10,602	$h_{\text{обр}}$	0,0399

Точность расчета по формуле (6.3) повышается при использовании коэффициентов $h_{\text{обр}}$ и h_j для отдельных классов химических соединений. Значения этих коэффициентов приведены в табл. 6.3.

Погрешность расчета φ_H по формуле (6.3) с использованием коэффициентов табл. 6.3 составляет 5 %.

Таблица 6.3

Значения коэффициентов $h_{обр}$ и h_j для различных классов химических соединений

Класс соединений	$h_{обр}$	h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}
Алканы	0,0399	3,919	4,483	–	–	–
Алифатические спирты	0,0432	4,287	4,889	–0,522	–	–
Алкены	0,0419	4,141	4,727	–	–	–
Ароматические углеводороды	0,0489	4,904	5,569	–	–	–
Алкилхлориды	0,0399	3,919	4,483	–	–	–0,586
Алкиламины	0,0360	3,501	4,006	–	–0,494	
Кетоны	0,0453	4,534	5,142	–0,522		
Альдегиды	0,0490	4,936	5,583	–0,522		
Карбоновые кислоты	0,0594	6,087	6,847	–0,522		
Эфиры карбоновых кислот	0,0510	5,161	5,830	–0,522		
Простые эфиры	0,0415	4,113	4,679	–0,522		

Величину нижнего концентрационного предела воспламенения φ_H можно вычислить по формуле:



$$\varphi_H = \frac{1100}{\sum(h_s \cdot m_s)}, \quad (6.4)$$

где h_s – коэффициенты связей элементов, входящих в состав молекулы. Значения коэффициентов связей приведены в табл. 6.4;

m_s – количество связей.

Таблица 6.4

Значения коэффициентов h_s для расчета нижнего концентрационного предела воспламенения по формуле (6.4)

Вид связи	h_s	Вид связи	h_s
C – C	41,2	O – H	5,7
C = C	122,1	C – N	25,0
C ≡ C	341,5	N – H	20,9
C – H	49,2	C – Cl	7,8
C – O	10,9	N – N	152,2
C = O	34,3		485,4
		Углеродный скелет бензольного кольца	

Верхний концентрационный предел воспламенения φ_B для индивидуальных органических веществ, молекулы которых состоят из атомов C, H, O, N, Cl, рассчитывается в зависимости от величины стехиометрического коэффициента кислорода в реакции горения β по формулам:

$$\varphi_B = \frac{100}{\sum_{j=1}^l (h_j \cdot m_j) + \sum_{s=1}^q q_s} \quad \text{при } \beta \leq 8 \quad (6.5)$$

$$\varphi_B = \frac{100}{0,768\beta + 6,554} \quad \text{при } \beta > 8, \quad (6.6)$$

где h_j и q_s – постоянные коэффициенты, характеризующие структурные особенности вещества (их значения принимаются по табл. 6.5–6.6);

m_j – количество связей j -го типа в молекуле соединения;

m_C, m_H, m_O, m_{Cl} – число атомов углерода, водорода, хлора и кислорода в молекуле.

Величина β вычисляется по соотношению (6.2).

Относительная средняя погрешность расчета φ_B по формулам (6.5) и (6.6) не превышает 15 %.

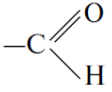
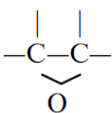
Таблица 6.5

Значения коэффициента h_j для расчета верхнего концентрационного предела воспламенения по формуле (6.5)

Связь	h_j	Связь	h_j
C – H	1,39	C – Cl	0,71
C – C	-0,84	C – N	-1,77
C = C	0,24	N – H	0,69
C – O	-1,40	N ≡ C	2,07
C = O	1,31	C ≡ C	1,93
O – H	1,25	C---C	0,89

Таблица 6.6

Значения коэффициента q_s для расчета верхнего концентрационного предела воспламенения по формуле (6.5)

Структурная группа	q_s
	-1,47
Неароматический цикл	$9/m_c$
	1,11

Расчет концентрационных пределов воспламенения для смеси газов или паров.

Для вычисления нижнего или верхнего концентрационных пределов воспламенения смеси горючих газов или паров применима формула Ле-Шателье:

$$\varphi_{\Pi}^{\text{см}} = \frac{100}{\sum \frac{\varphi_{\Gamma i}}{\varphi_{\Pi i}}}, \quad (6.7)$$

где $\varphi_{\Gamma i}$ – концентрация i -го горючего компонента в смеси, % об.;

$\varphi_{\Pi i}$ – нижний или верхний концентрационный пределы воспламенения i -го горючего компонента, % об.

Формула Ле-Шателье справедлива для большинства смесей веществ, не вступающих в химическую реакцию.

При наличии в смеси негорючих (флегматизирующих) добавок расчет нижнего или верхнего концентрационных пределов воспламенения смеси газов или паров ведут по формуле:

$$\varphi_{\text{б.п.}}^{\text{см}} = \frac{\varphi_{\text{п}} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{\text{н.г.}}}{100 - \varphi_{\text{н.г.}}}\right) \cdot 100}{100 + \varphi_{\text{п}} \cdot \frac{\varphi_{\text{н.г.}}}{100 - \varphi_{\text{н.г.}}}}, \quad (6.8)$$

где $\varphi_{\text{н.г.}}$ – концентрация негорючих газов в смеси, % об.;

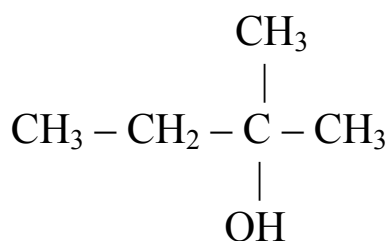
$\varphi_{\text{п}}$ – нижний или верхний концентрационный пределы воспламенения смеси, рассчитанные по формуле Ле-Шателье, % об.

Пример 1.

Рассчитать концентрационные пределы воспламенения 2-метилбутанола-2.

Решение.

Записывается структурная формула вещества



а. Расчет НКПВ и ВКПВ по формуле (6.1).

Рассчитывается β по формуле (6.2):

$$\beta = 5 + \frac{12}{4} - \frac{1}{2} = 7,5.$$

Нижний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{8,684 \cdot 7,5 + 4,679} = 1,43 \text{ \% об.}$$

Верхний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{100}{1,550 \cdot 7,5 + 0,560} = 8,21 \text{ \%об.}$$

б. Расчет НКПВ по формуле (6.3) по табл. 6.2.

Стандартная теплота образования $\Delta H_{\text{обр}}^{\circ} = -330$ кДж/моль.

С учетом приведенной формулы $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ $m_{\text{C}} = 5$; $m_{\text{H}} = 12$; $m_{\text{O}} = 1$.
Принимая значения коэффициентов h_{C} , h_{H} , h_{O} по табл. 6.2, получается

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + 0,0399 \cdot (-330) + 3,939 \cdot 5 + 4,476 \cdot 12 + (-0,522) \cdot 1} = 1,65 \text{ \%об.}$$

Принимая значения коэффициентов h_{C} , h_{H} , h_{O} по табл. 6.3:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{1 + 0,0432 \cdot (-330) + 4,287 \cdot 5 + 4,889 \cdot 12 + (-0,522) \cdot 1} = 1,51 \text{ \%об.}$$

в. Расчет НКПВ по формуле (6.4).

Вид связи	C–C	C–H	C–O	O–H
Количество связей m_s	4	11	1	1

С учетом коэффициентов h_s из табл. 6.4:

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{1100}{41,2 \cdot 4 + 49,2 \cdot 11 + 10,9 \cdot 1 + 5,7 \cdot 1} = 1,52 \text{ \%об.}$$

г. При $\beta < 8$ расчет ВКПВ ведется по формуле (6.5) и с учетом коэффициентов h_j из табл. 6.5

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{100}{1,39 \cdot 11 + (-0,84) \cdot 4 + (-1,4) \cdot 1 + 1,25 \cdot 1} = 8,49 \text{ \%об.}$$

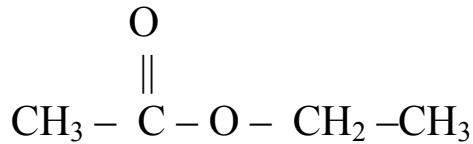
Справочные данные $\varphi_{\text{н}} = 1,5 \text{ \% об.}$, $\varphi_{\text{в}} = 8,3 \text{ \% об.}$ [5, С. 156].

Пример 2.

Рассчитать концентрационные пределы воспламенения этилэтаната $C_4H_8O_2$ (этиловый эфир этановой кислоты или этилацетат).

Решение.

Записывается структурная формула вещества



а. Расчет НКПВ и ВКПВ по формуле (6.1).

Рассчитывается β по формуле (6.2):

$$\beta = 4 + \frac{8}{4} - \frac{2}{2} = 5.$$

Нижний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = 2,08 \text{ \%об.}$$

Верхний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{100}{1,550 \cdot 5 + 0,560} = 12,03 \text{ \%об.}$$

б. Расчет НКПВ по формуле (6.2) по табл. 6.2.

Стандартная теплота образования $\Delta H_{\text{обр}}^{\circ} = -442,9$ кДж/моль.

С учетом приведенной формулы $C_4H_8O_2$ $m_{\text{C}} = 4$; $m_{\text{H}} = 8$; $m_{\text{O}} = 2$.

Принимая значения коэффициентов h_{C} , h_{H} , h_{O} по табл. 6.2:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{н}} &= \frac{100}{1 + 0,0399 \cdot (-442,9) + 3,939 \cdot 4 + 4,476 \cdot 8 + (-0,522) \cdot 2} = \\ &= 2,96 \text{ \%об.} \end{aligned}$$

Принимая значения коэффициентов h_{C} , h_{H} , h_{O} по табл. 6.3:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{н}} &= \frac{100}{1 + 0,0512 \cdot (-442,9) + 5,161 \cdot 4 + 5,830 \cdot 8 + (-0,522) \cdot 2} = \\ &= 2,2 \text{ \%об.} \end{aligned}$$

в. Расчет НКПВ по формуле (6.4).

Вид связи	C-C	C-H	C-O	C=O
Количество связей m_s	2	8	2	1

С учетом коэффициентов h_s из табл. 6.4:

$$\varphi_H = \frac{1100}{41,2 \cdot 2 + 49,2 \cdot 8 + 10,9 \cdot 2 + 34,3 \cdot 1} = 2,07 \text{ \% об.}$$

г. Поскольку $\beta < 8$, то расчет ВКПВ ведется по формуле (6.6) и с учетом коэффициентов h_j из табл. 6.5:

$$\varphi_B = \frac{100}{1,39 \cdot 8 + (-0,84) \cdot 2 + (-1,4) \cdot 2 + 1,31 \cdot 1} = 12,58 \text{ \% об.}$$

Справочные данные $\varphi_H = 2,0 \text{ \% об.}$, $\varphi_B = 11,4 \text{ \% об.}$ [6, С.706].

Пример 3.

Рассчитать область воспламенения смеси, содержащей 80 % метана, 10 % пропана и 10 % этена.

Решение.

Рассчитывается β по формуле (6.2)

$$\beta(\text{CH}_4) = 1 + \frac{4}{4} = 2;$$

$$\beta(\text{C}_3\text{H}_8) = 3 + \frac{8}{4} = 5;$$

$$\beta(\text{C}_2\text{H}_4) = 2 + \frac{4}{4} = 3.$$

Концентрационные пределы воспламенения φ_H для индивидуальных горючих компонентов можно вычислить по формуле (6.1).

Нижний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_H(\text{CH}_4) = \frac{100}{8,684 \cdot 2 + 4,679} = 4,54 \text{ \% об.};$$

$$\varphi_{\text{H}}(\text{C}_3\text{H}_8) = \frac{100}{8,684 \cdot 5 + 4,679} = 2,08 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{H}}(\text{C}_2\text{H}_4) = \frac{100}{8,684 \cdot 3 + 4,679} = 3,25 \text{ \%об.}$$

Верхний концентрационный предел воспламенения

$$\varphi_{\text{B}}(\text{CH}_4) = \frac{100}{1,550 \cdot 2 + 0,560} = 27,32 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{B}}(\text{C}_3\text{H}_8) = \frac{100}{1,550 \cdot 5 + 0,560} = 12,03 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{B}}(\text{C}_2\text{H}_4) = \frac{100}{1,550 \cdot 3 + 0,560} = 19,19 \text{ \%об.}$$

Справочные данные для метана 5,28–14,1 % об. [6, С.73], пропана 2,3–9,4 % об. [6, С.360], этена 2,7–34 % об. [6, С. 717].

Для вычисления нижнего или верхнего концентрационных пределов воспламенения смеси газов или паров применима формула Ле-Шателье (6.7):

$$\varphi_{\text{H}}^{\text{см}} = \frac{100}{\frac{80}{4,54} + \frac{10}{2,08} + \frac{10}{3,25}} = 4,12 \text{ \%об.}$$

$$\varphi_{\text{B}}^{\text{см}} = \frac{100}{\frac{80}{27,32} + \frac{10}{12,03} + \frac{10}{19,19}} = 23,36 \text{ \%об.}$$

Пример 4.

Вычислить область воспламенения генераторного газа состава, % об.: CO – 28, H₂ – 14, N₂ – 53, CO₂ – 5. Концентрационные пределы воспламенения для CO 12,5 – 74 % об., для H₂ 4,12–75 % об.

Решение.

Определяется концентрация горючих компонентов в пересчете на 100 %

$$\varphi_{\text{CO}} = \frac{28 \cdot 100}{28 + 14} = 66,7 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{H}_2} = \frac{14 \cdot 100}{28 + 14} = 33,3 \text{ \%об.}$$

Определяется область воспламенения смеси горючих компонентов по формуле Ле-Шателье

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{100}{\frac{66,7}{12,5} + \frac{33,3}{4,12}} = 7,45 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{B}} = \frac{100}{\frac{66,7}{74} + \frac{33,3}{75}} = 74,33 \text{ \%об.}$$

По формуле (6.8) определяется область воспламенения генераторного газа с учетом содержания негорючих газов

$$\varphi_{\text{н.г.}} = 53 + 5 = 58 \text{ \% об.}$$

$$\varphi_{\text{б.н}}^{\text{см}} = \frac{7,45 \cdot \left(1 + \frac{58}{100 - 58}\right) \cdot 100}{100 + 7,45 \cdot \frac{58}{100 - 58}} = 16,08 \text{ \%об.};$$

$$\varphi_{\text{б.н}}^{\text{см}} = \frac{74,33 \cdot \left(1 + \frac{58}{100 - 58}\right) \cdot 100}{100 + 74,33 \cdot \frac{58}{100 - 58}} = 87,33 \text{ \%об.}$$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить нижний концентрационный предел воспламенения этана, пропана, бутана, гептана, гексана. Как изменяется нижний концентрационный предел воспламенения в воздухе от положения предельных углеводородов в гомологическом ряду. Построить график зависимости НКПВ от молекулярной массы горючего.

2. По аппроксимационной формуле (6.1) рассчитать, как изменяются концентрационные пределы насыщенных спиртов (метанола, этанола, гексанола, октанола) в воздухе. Построить график зависимости нижнего и верхнего пределов воспламенения от молекулярной массы горючего.

3. Определить концентрационные пределы распространения пламени газовой смеси, состоящей 40 % пропана, 50 % бутана и 10 % пропилена.

4. Определить концентрационные пределы воспламенения в воздухе смеси паров, состоящей из 50 % бензола, 35 % толуола и 15 % диоксида углерода.

5. Рассчитать нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения:

- а) индивидуального вещества X по разным формулам;
- б) смеси вещества с негорючими газами (концентрация негорючих газов в смеси $\varphi_{н.г.}$).

Исходные данные приведены в табл. 6.7. Сравнить полученные значения со справочными данными (указать источник и страницу).

Таблица 6.7

Исходные данные

Вар.	Вещество X	Содержание негорючих газов в смеси $\varphi_{н.г.}$, % об.
1	ацетальдегид (этаналь)	10
2	ацетон (пропанон, диметилкетон)	50
3	анилин (аминобензол, фениламин)	34
4	н-амиловый спирт (пентанол-1)	15
5	бензол	26
6	бутанол-1 (н-бутиловый спирт)	12
7	н-гексан	36
8	н-гексиловый спирт (гексанол-1)	20
9	н-гептан	48
10	глицерин (пропантриол-1,2,3)	42
11	1,2-дихлорэтан	25
12	диэтиловый эфир (этоксиэтан)	56
13	изобутиловый спирт (2-метилпропанол-1)	52
14	изопентан (2-метилбутан)	18
15	изопропиловый спирт (пропанол-2)	30
16	изопропилбензол (кумол)	38
17	м-ксилол (1,3-диметилбензол)	24
18	о-ксилол (1,2-диметилбензол)	46
19	п-ксилол (1,4-диметилбензол)	35
20	метилпропилкетон (пентанон-2)	58
21	н-октан	55
22	н-пентан	28
23	н-пропиловый спирт (пропанол-1)	14
24	стирол (винилбензол)	44
25	формальдегид (метаналь)	40
26	хлорбензол	54
27	хлорэтан	16
28	циклогексан	22
29	этилацетат (этилэтанойат)	45
30	этилбензол	32

7. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ

Температура вспышки – самая низкая температура горючего вещества, при которой над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для возникновения устойчивого горения.

Температура воспламенения – наименьшая температура горючего вещества, при которой вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их воспламенения от источника зажигания возникает устойчивое горение.

Температура вспышки $t_{\text{всп}}$ (°С) веществ в закрытом тигле, имеющих нижеперечисленные структурные группы (табл. 7.1), рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659 \cdot t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^q a_j \cdot l_j, \quad (7.1)$$

где $t_{\text{кип}}$ – температура кипения исследуемой жидкости, °С;

l_j – число структурных групп j -го вида в молекуле;

a_j – эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 7.1.

Средняя квадратичная погрешность расчета по формуле (7.1) составляет 9–13 °С.

Для органических соединений, состоящих из атомов С, Н, О, N, а также галоидорганических и элементоорганических соединений, содержащих атомы S, Si, P, Cl, температура вспышки (°С) рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{всп}} = C_0 + C_1 \Delta t_{\text{кип}} + C_2 |\Delta H_{\text{сг}}|, \quad (7.2)$$

где $\Delta H_{\text{сг}}$ – мольная теплота сгорания вещества, кДж/моль;

C_0 , C_1 , C_2 – эмпирические константы, величины которых приведены в табл. 7.2.

Средняя квадратическая погрешность расчета по формуле (7.2) составляет 9–13°С.

Таблица 7.1

Значения эмпирических коэффициентов a_j (для различных видов структурных групп) для расчета температуры вспышки в закрытом тигле

Структурная группа	$a_j, ^\circ\text{C}$	Структурная группа	$a_j, ^\circ\text{C}$
C–C	–2,03	C=O	11,66
C—C	–0,28	C≡N	12,13
C–H	1,105	N–H	5,83
C–O	2,47	O–H	23,90
C=C	1,72	C–F	3,33
C–N	14,15	C–S	2,09
C–Cl	15,11	C=S	–11,91
C–Br	19,40	H–S	5,64
Si–H	11,00	P–O	3,27
Si–C	–4,84	P=O	9,64
Si–Cl	10,07		

Таблица 7.2

Значения эмпирических констант C_0, C_1, C_2 (для различных классов соединений) для расчета температуры вспышки в закрытом тигле

Класс соединений	C_0	C_1	C_2
Соединения, состоящие из: –атомов C, H, O, N	–45,5	0,83	–0,0082
–атомов C, H, O, N, Cl	–39,6	0,79	–0,0114
Соединения, содержащие атомы F, Br	–57,4	0,79	–0,0147
Элементоорганические соединения, содержащие атомы S, Si, P, Cl	–45,5	0,83	–0,0082

Более точная температура вспышки классов веществ рассчитывается по формуле

$$t_{\text{всп}} = a + b \cdot t_{\text{кип}}, \quad (7.3)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены табл. 7.3.

Средняя квадратическая погрешность при расчете по формуле (7.3) составляет 3–5 °С.

Таблица 7.3

Значения эмпирических коэффициентов a и b (для разных классов веществ) для расчета температуры вспышки в закрытом тигле

Класс веществ	$a, ^\circ\text{C}$	b
Алканы	-73,22	0,693
Спирты	-41,69	0,652
Алкиланилины	-21,94	0,533
Карбоновые кислоты	-43,57	0,708
Алкилфенолы	-38,42	0,623
Ароматические углеводороды	-67,83	0,665
Альдегиды	-74,76	0,813
Бромалканы	-49,56	0,665
Кетоны	-52,69	0,643
Хлоралканы	-55,70	0,631

Температура воспламенения $t_{\text{восп}}$ (°С) индивидуальных жидкостей вычисляется по формуле:

$$t_{\text{восп}} = -47,79 + 0,882 \cdot t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^q a_j \cdot l_j, \quad (7.4)$$

где a_j – эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 7.4.

Средняя квадратическая погрешность расчета составляет 5 °С.

Значения эмпирических коэффициентов a_j
к расчету температуры воспламенения

Структурная группа	$a_j, ^\circ\text{C}$	Структурная группа	$a_j, ^\circ\text{C}$
C–C	0,027	C=O	-0,826
C---C	-2,069	C–N	-5,876
C=C	-8,980	O–H	8,216
C–H	-2,118	N–H	-0,261
C–O	-0,111		

Температура воспламенения алифатических спиртов и сложных эфиров рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{восп}} = \frac{t_{\text{кип}} + 273}{1 + k(t_{\text{кип}} + 273)} - 273, \quad (7.5)$$

где $t_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости, $^\circ\text{C}$;

k – эмпирический коэффициент, составляющий $6 \cdot 10^{-4}$ для спиртов и $7 \cdot 10^{-4}$ для сложных эфиров.

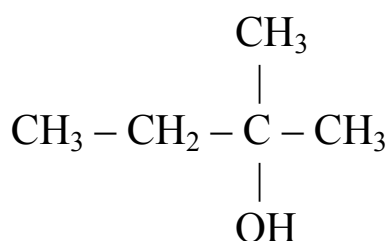
Средняя квадратическая погрешность расчета температуры воспламенения спиртов и сложных эфиров по формуле (7.5) составляет соответственно 2 и 4 $^\circ\text{C}$.

Пример 1.

Рассчитать температуру вспышки и воспламенения 2-метилбутанола-2 (трет-амиловый спирт). Температура кипения 102,3 $^\circ\text{C}$.

Решение.

Формула 2-метилбутанола-2



В молекуле спирта четыре связи С–С, одиннадцать связей С–Н, одна связь С–О и одна связь О–Н.

Температура вспышки по формуле (7.1) с учетом табл. 7.1

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659 \cdot 102,3 + (-2,03) \cdot 4 + 1,105 \cdot 11 + 2,47 \cdot 1 + 23,9 \cdot 1 = 24,66 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура вспышки по формуле (7.3) с учетом табл. 7.3

$$t_{\text{всп}} = -41,69 + 0,652 \cdot 102,3 = 25,01 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура воспламенения по формуле (7.4) с учетом табл. 7.4

$$t_{\text{восп}} = -47,79 + 0,882 \cdot 102,3 + 0,027 \cdot 4 + (-2,118) \cdot 11 + (-0,111) \cdot 1 + 8,216 \cdot 1 = 27,65 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура воспламенения по формуле (7.5)

$$t_{\text{восп}} = \frac{102,3 + 273}{1 + 0,0006(102,3 + 273)} - 273 = 33,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

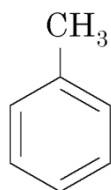
Справочные данные $t_{\text{всп}} = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_{\text{восп}} = 34 \text{ } ^\circ\text{C}$ [5, С. 156].

Пример 2.

Рассчитать температуру вспышки толуола по формуле (7.1).
Температура кипения $110,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Решение.

Формула толуола (метилбензола)



В молекуле толуола шесть связей С—С, одна связь С–С и восемь связей С–Н.

Температура вспышки по формуле (7.1) с учетом табл. 7.1

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + 0,659 \cdot 110,6 + (-0,28) \cdot 6 + (-2,03) \cdot 1 + 1,105 \cdot 8 = 4,86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура вспышки по формуле (7.3) с учетом табл. 7.3

$$t_{\text{всп}} = -67,83 + 0,665 \cdot 110,6 = 5,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура воспламенения по формуле (7.4)

$$t_{\text{восп}} = -47,79 + 0,882 \cdot 110,6 + 0,027 \cdot 1 + (-2,118) \cdot 8 + (-2,029) \cdot 6 = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Справочные данные $t_{\text{восп}} = 7 \text{ } ^\circ\text{C}$ [6, С. 519].

Пример 3.

Рассчитать температуру вспышки диэтиламина по формуле (7.2). Температура кипения $55,2 \text{ } ^\circ\text{C}$, теплота сгорания 2820 кДж/моль .

Решение.

По формуле (7.2) с учетом табл. 7.2 находим

$$t_{\text{восп}} = -45,5 + 0,83 \cdot 55,2 + (-0,0082) \cdot 2820 = -23,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Справочные данные $t_{\text{восп}} = -26 \text{ } ^\circ\text{C}$ [5, С. 516].

Задания для самостоятельной работы

1. Определить температуру вспышки в закрытом тигле и температуру воспламенения п-этилфенола (температура кипения $219 \text{ } ^\circ\text{C}$).

2. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле и температуру воспламенения пропилбензола (температура кипения $159 \text{ } ^\circ\text{C}$).

3. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле и температуру воспламенения 2-метилгексана (температура кипения $90,1 \text{ } ^\circ\text{C}$).

4. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле и температуру воспламенения метилэтилкетона (температура кипения $79,6 \text{ } ^\circ\text{C}$).

5. Рассчитать температуру вспышки в закрытом тигле и температуру воспламенения для вещества X (табл. 7.5). Сравнить полученные значения со справочными данными.

Исходные данные

Вар	Вещество X
1	ацетальдегид (этаналь)
2	ацетон (пропанон, диметилкетон)
3	анилин (аминобензол, фениламин)
4	н-амиловый спирт (пентанол-1)
5	бензол
6	бутанол-1 (н-бутиловый спирт)
7	н-гексан
8	н-гексиловый спирт (гексанол-1)
9	н-гептан
10	глицерин (пропантриол-1,2,3)
11	1,2-дихлорэтан
12	диэтиловый эфир (этоксиэтан)
13	изобутиловый спирт (2-метилпропанол-1)
14	изопентан (2-метилбутан)
15	изопропиловый спирт (пропанол-2)
16	изопропилбензол (кумол)
17	м-ксилол (1,3-диметилбензол)
18	о-ксилол (1,2-диметилбензол)
19	п-ксилол (1,4-диметилбензол)
20	метилпропилкетон (пентанон-2)
21	н-октан
22	н-пентан
23	н-пропиловый спирт (пропанол-1)
24	стирол (винилбензол)
25	хлорбензол
26	хлорэтан
27	циклогексан
28	этилацетат (этилэтанойат)
29	этилбензол
30	этиленгликоль

8. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ

Нижний температурный предел воспламенения (НТПВ) – температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров над ее поверхностью равна НКПВ. Аналогично при верхнем температурном пределе воспламенения (ВТПВ) концентрация насыщенных паров жидкости равна ВКПВ. Из этого следует, что если для горючего вещества известны концентрационные пределы воспламенения, то по зависимости давления насыщенного пара от температуры могут быть найдены температурные пределы.

Если известна зависимость давления насыщенных паров жидкости от температуры, то величина нижнего или верхнего температурного предела воспламенения t_n (°C) может быть вычислена с использованием соответствующего значения концентрационного предела распространения пламени φ_n по формуле:

$$t_n = \frac{B}{A - \lg(\varphi_n \cdot P_0 / 100)} - C, \quad (8.1)$$

где A , B , C – константы уравнения Антуана, выражающего зависимость давления насыщенных паров жидкостей приведены в прил. 6;

P_0 – атмосферное давление, кПа.

Для веществ, молекулы которых включают структурные группы, представленные в табл. 8.1, температурные пределы рассчитываются по формулам:

$$t_n = -62,5 + 0,655t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j \quad (8.2)$$


$$t_b = -41,4 + 0,723t_{\text{кип}} + \sum_{j=2}^n a_j l_j, \quad (8.3)$$

где l_j – число связей и структурных групп вида a_j в молекуле. Значения коэффициентов a_j приведены в табл. 8.1.

Среднее квадратическое отклонение расчетных данных по формулам (8.2) и (8.3) от экспериментальных составляет 8 °C.

Таблица 8.1

Величины коэффициентов a_j для вычисления температурных пределов воспламенения по формулам (8.2) и (8.3)

Связь или структурная группа	a_j		Связь или структурная группа	a_j	
	$t_{\text{н}}$	$t_{\text{в}}$		$t_{\text{н}}$	$t_{\text{в}}$
C–H	–0,009	0,570		–4,40	–4,60
C–C	–0,909	–1,158	C–N	–2,14	0,0967
C–O	0,110	1,267	N–H	6,53	6,152
O–H	19,75	17,80	C=C	–2,66	–4,64
C=O	5,57	5,86			

Более точные результаты расчета температурных пределов достигаются при использовании линейной взаимосвязи этих величин с температурой кипения. Температурные пределы воспламенения жидкостей рассчитываются по температуре кипения

$$t_{\text{н(в)}} = kt_{\text{кип}} - l, \quad (8.4)$$

где $t_{\text{н(в)}}$ – нижний (верхний) температурный предел воспламенения;
 $t_{\text{кип}}$ – температура кипения исследуемой жидкости, °С;
 k и λ – константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей (приведены в табл. 8.2).

Средняя погрешность не превышает 6 °С.

Таблица 8.2

Величины параметров k и λ для вычисления температурных пределов воспламенения некоторых жидкостей по формуле (8.4)

Класс соединений	Температурный предел	k	λ
Алканы	нижний	0,69	74
	верхний	0,79	51
Спирты	нижний	0,61	38
	верхний	0,69	15
Алкиламины (первичные)	нижний	0,50	55
Алкилформиаты	нижний	0,62	57
	верхний	0,79	38
Алкилацетаты	нижний	0,67	61
	верхний	0,84	43
Алкилпропионаты	нижний	0,71	65
	верхний	0,86	46
Алкилбутираты	нижний	0,72	69
	верхний	0,86	47
Алкилхлориды	нижний	0,71	64
	верхний	0,81	42
Алкилбромиды	нижний	0,58	47
	верхний	0,67	40
Алкилиодиды	нижний	0,81	78

Пример 1.

Рассчитать нижний температурный предел воспламенения изопропилового спирта (пропанола-2). Нижний концентрационный предел воспламенения изопропилового спирта равен 2,23 % об.; константы уравнения Антуана $A = 7,5106$; $B = 1733,0$; $C = 232,38$. Атмосферное давление равно нормальному $P_0 = 101,3$ кПа.

Решение.

Нижний температурный предел воспламенения, рассчитываемый по формуле (8.1)

$$t_{\text{H}} = \frac{1733,0}{7,5106 - \lg\left(2,23 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 232,38 = 9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Справочное значение нижнего температурного предела воспламенения изопропилового спирта равно 11 °С [5, С. 576].

Пример 2.

Рассчитать температурные пределы воспламенения метилового спирта. Температура кипения 64,9 °С. Концентрационные пределы воспламенения 6,98–35,5 % об. Константы уравнения Антуана $A = 7,3527$; $B = 1660,454$; $C = 245,818$.

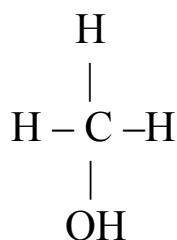
Решение.

Температурные пределы распространения пламени по формуле (8.1)

$$t_{\text{H}} = \frac{1660,454}{7,3527 - \lg\left(6,98 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 245,818 = 9,5 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{B}} = \frac{1660,454}{7,3527 - \lg\left(35,5 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 245,818 = 40,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температурные пределы распространения пламени по формулам (8.2) и (8.3).



В молекуле спирта три связи С–Н, одна связь С–О и одна связь О–Н. Значения констант a_j определяются по табл. 8.2.

$$t_{\text{H}} = -62,5 + 0,655 \cdot 64,9 + (-0,009) \cdot 3 + 0,11 \cdot 1 + 19,75 \cdot 1 = -0,158 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{B}} = -41,4 + 0,723 \cdot 64,9 + 0,57 \cdot 3 + 1,267 \cdot 1 + 17,8 \cdot 1 = 26,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Температурные пределы воспламенения по формуле (8.4).
Значение констант k и λ определяются по табл. 8.3 для спиртов

$$t_{\text{н}} = 0,61 \cdot 64,9 - 38 = 1,59 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{в}} = 0,69 \cdot 64,9 - 15 = 29,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Согласно справочным данным [6, С. 97] НТПВ = 5 °С,
ВТПВ = 39 °С.

Пример 3.

Рассчитать температурные пределы воспламенения
2-метилбутанола-2 (трет-амиловый спирт). Температура кипения
102,3 °С. Концентрационные пределы воспламенения 1,5–8,3 % об.
Константы уравнения Антуана $A = 6,44711$; $B = 1252,216$; $C = 180,301$.

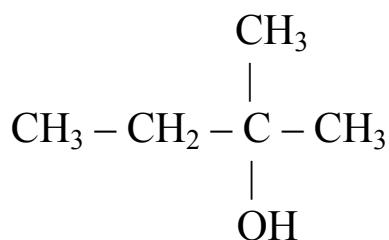
Решение.

Температурные пределы воспламенения по формуле (8.1)

$$t_{\text{н}} = \frac{1252,216}{6,44711 - \lg\left(1,5 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 180,301 = 19,56 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{в}} = \frac{1252,216}{6,44711 - \lg\left(8,3 \cdot \frac{101,3}{100}\right)} - 180,301 = 46,45 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температурные пределы воспламенения по формулам (8.2)
и (8.3).



В молекуле спирта четыре связи С–С, одиннадцать связей С–Н,
одна связь С–О и одна связь О–Н. Значения констант a_j определяются
по табл. 8.2.

$$t_{\text{H}} = -62,5 + 0,655 \cdot 102,3 + (-0,009) \cdot 11 + (-0,909) \cdot 4 + 0,11 \cdot 1 + 19,75 \cdot 1 = 20,679^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{B}} = -41,4 + 0,723 \cdot 102,3 + 0,57 \cdot 11 + (-1,158) \cdot 4 + 1,267 \cdot 1 + 17,8 \cdot 1 = 53,268^{\circ}\text{C}.$$

Температурные пределы воспламенения метилового спирта рассчитываются по формуле (8.4). Значения констант k и λ определяются по табл. 8.3 для спиртов.

$$t_{\text{H}} = 0,61 \cdot 102,3 - 38 = 24,4^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{B}} = 0,69 \cdot 102,3 - 15 = 55,59^{\circ}\text{C}.$$

Согласно справочным данным [5, С.156] НТПВ = 23 °С, ВТПВ = 55 °С.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить температурные пределы воспламенения пентанола-3 (температура кипения 116 °С, константы уравнения Антуана $A = 6,567423$, $B = 1354,42$, $C = 183,41$, концентрационные пределы воспламенения 1,5–9,8 % об.).

2. Определить температурные пределы воспламенения бутилацетата (температура кипения 126,5 °С, константы уравнения Антуана $A = 6,25205$, $B = 1430,418$, $C = 210,745$, концентрационные пределы воспламенения 1,35–9,0 % об.).

3. Определить температурные пределы воспламенения этилформиата (этиловый эфир метановой кислоты) (температура кипения 54 °С, константы уравнения Антуана $A = 6,13395$, $B = 1123,943$, $C = 218,247$, концентрационные пределы воспламенения 3,2–16 % об.).

4. Рассчитать температурные пределы воспламенения для вещества X (табл. 8.3). Сравнить полученные значения со справочными данными.

Исходные данные к задаче 4

Вар	Вещество X
1	ацетальдегид (этаналь)
2	ацетон (пропанон, диметилкетон)
3	анилин (аминобензол, фениламин)
4	н-амиловый спирт (пентанол-1)
5	бензол
6	бутанол-1 (н-бутиловый спирт)
7	н-гексан
8	н-гексиловый спирт (гексанол-1)
9	н-гептан
10	глицерин (пропантриол-1,2,3)
11	1,2-дихлорэтан
12	диэтиловый эфир (этоксиэтан)
13	изобутиловый спирт (2-метилпропанол-1)
14	изопентан (2-метилбутан)
15	изопропиловый спирт (пропанол-2)
16	изопропилбензол (кумол)
17	м-ксилол (1,3-диметилбензол)
18	о-ксилол (1,2-диметилбензол)
19	п-ксилол (1,4-диметилбензол)
20	метилпропилкетон (пентанон-2)
21	н-октан
22	н-пентан
23	н-пропиловый спирт (пропанол-1)
24	стирол (винилбензол)
25	хлорбензол
26	хлорэтан
27	циклогексан
28	этилацетат (этилэтаноат)
29	этилбензол
30	этиленгликоль

9. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО ФОНТАНА

Борьба с пожарами на нефтяных и газовых месторождениях, часто находящихся в труднодоступных районах, требует привлечения огромных материально-технических ресурсов и может длиться неделями.

Пожары на открыто фонтанирующих газонефтяных скважинах являются одними из наиболее сложных видов промышленных аварий. Некоторое представление о пожаре на фонтанирующей скважине можно получить по следующим данным: высота горящего факела мощных газовых фонтанов может достигать – 80–100 м, а интенсивность тепловыделения в факеле – несколько миллионов киловатт.

Пожары фонтанов условно разделяют на три группы:

- *газовые* – фонтаны с содержанием горючего газа не менее 95 % по массе;

- *гаzoneфтяные* – фонтаны с содержанием горючего газа более 50 % и нефти 10–50 % по массе;

- *нефтяные* – фонтаны с дебитом нефти более 50 % по массе.

Кроме того, газовые и газонефтяные фонтаны условно подразделяются по мощности (дебиту):

- *на слабые* – с дебитом газа до 2 млн м³/сутки;

- *средние* – от 2 до 5 млн м³/сутки;

- *мощные* – свыше 5 млн м³/сутки.

По конфигурации пламени различают фонтаны:

- *компактные* (фонтанирование происходит через открытую обсадную или горизонтальную трубу или эксплуатационную колонну, тройник, крестовину);

- *распыленные* (истечение происходит через неплотности или устье загромождено буровым оборудованием);

- *комбинированные* (имеется распыленный и компактный факел).

По количеству скважин: одиночные и групповые.

При авариях на скважинах истечение газа из фонтанной арматуры происходит при высоких перепадах давления, значительно

превышающих критических, т.е. на срезе трубы устанавливается скорость истечения, равная скорости звука.

В целом особенности обстановки при пожаре газонефтяных фонтанов можно характеризовать следующими параметрами: большой скоростью распространения горения в объеме фонтанирующей струи, значительной скоростью стабилизации теплофизических параметров; возможностью распространения пожара в пределах зоны загазованности и разлива нефти, а также возможностью изменения во времени характера фонтанирования, состава, вида струи и дебита; образованием группового фонтанирования на кустах скважин.

Горение газового фонтана является диффузионным. В окружающую атмосферу вытекает свежий газ, а горение происходит в результате взаимной диффузии газа и кислорода воздуха. Горение газовых фонтанов устойчивое, которое может длиться неделями и даже месяцами и не зависит от метеорологических условий – ветра, дождя и т.п. Для ликвидации такого пожара необходимо огромное количество сил и средств.

При наличии механических препятствий, металлической арматуры на пути газовой струи происходит ее разбиение и распыление. В результате увеличивается поперечный диаметр факела при значительном уменьшении его высоты. Такой фонтан за счет высокой интенсивности перемешивания газа с воздухом отличается более устойчивым горением, повышенным тепловыделением и значительно труднее поддается тушению.

При диффузионном горении факела пламени на устье газового, газонефтяного или нефтяного фонтана, если нет возможности с помощью технических средств прекратить поступление горючего или изменить его состав введением в него огнетушащих средств, то единственный возможный способ тушения – это воздействие на факел пламени, так как прекратить доступ воздуха в зону горения факела пламени на фонтане или отток продуктов сгорания практически невозможно. При этом воздействовать на факел пламени можно различными механизмами прекращения горения.

При тушении пожаров на фонтанах охлаждать горящее вещество практически бесполезно, так как горючие газы способны гореть при любой начальной температуре, а горючие жидкости в условиях фонтана распыляются так интенсивно, что охладить их ниже температуры вспышки почти невозможно. Поэтому охлаждать

необходимо факел пламени, т.е. отводить тепло непосредственно из зоны горения. Это оказывается технически осуществимо потому, что при горении фонтана факел пламени имеет форму конуса с вершиной внизу, а основанием вверху. Область зажигающего кольца находится в вершине конуса, т.е. внизу, поэтому достаточно прекратить пламенное горение одновременно в области «зажигающего» кольца на непродолжительное время (1–2 с), чтобы горение прекратилось полностью и пожар был потушен.

На рис. 9.1 показана структура турбулентной горячей струи газа.

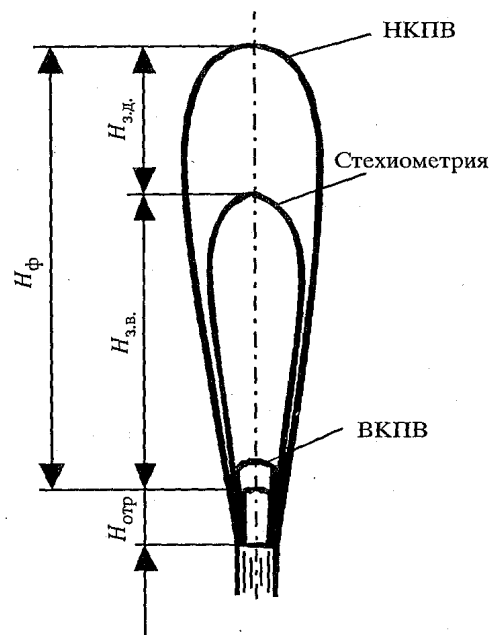


Рис. 9.1. Структура турбулентной горячей струи газа:
 $H_{з.в.}$ – длина зоны воспламенения; $H_{отр}$ – длина зоны отрыва,
 $H_{з.д.}$ – длина зоны догорания; $H_{ф}$ – высота факела

Видно, что существуют три концентрационные области газа, соответствующие нижнему, верхнему концентрационным пределам воспламенения и стехиометрическому составу смеси. Как известно, ниже нижнего и выше верхнего концентрационных пределов горение невозможно. Максимальная скорость горения будет достигаться в области, соответствующей стехиометрическому составу смеси. При турбулентном диффузионном горении концентрация кислорода в зоне горения снижается практически до нуля, в то время как температура и содержание продуктов горения достигают максимальных значений.

Распространение пламени в газовой струе осуществляется теплопроводностью и конвекцией с участием продуктов горения. Максимальная температура пламени находится в области стехиометрического соотношения газа и кислорода воздуха по периферии факела. Для большинства углеводородных газов температура пламени составляет 1350–1800 °С. По мере удаления от среза трубы область стехиометрии перемещается к оси трубы, достигая ее на некотором расстоянии от устья.

Расстояние между точкой возникновения пламенного горения и точкой на оси трубы, в которой достигается максимальная температура горения, называется *длиной зоны воспламенения* ($H_{з.в.}$). Длина зоны воспламенения зависит от физико-химических свойств газа, от содержания атомов углерода в молекуле горючего. Ниже зоны воспламенения до устья скважины горение отсутствует. Это связано с превышением скорости истечения газа над скоростью распространения пламени. Протяженность этого участка газовой струи называется *длиной зоны отрыва* ($H_{отр.}$). В практике тушения пожаров газовых фонтанов нередко используется механическое воздействие на эту зону в целях «срыва» факела. Выше зоны воспламенения выделяют *зону догорания*, протяженность которой ($H_{з.д.}$) зависит от физико-химической природы газа. Чем выше его молярная масса и, следовательно, выше потребность в кислороде при горении, тем больше длина этой зоны. Фронт пламени в зоне догорания имеет размытый неустойчивый характер.

Визуально наблюдаемая протяженность области пламенного горения ($H_{з.в.} + H_{з.д.}$) называется *длиной (высотой) факела горящего фонтана*, $H_{ф.}$

Нефтяные фонтаны с большим дебитом нефти незначительным содержанием газа имеют небольшую высоту факела пламени (около 20–30 м). Пламя газового фонтана имеет светло-желтую окраску. При пожарах газонефтяных фонтанов вся нефть, как правило, сгорает в воздухе, пламя имеет оранжевую окраску, иногда горение сопровождается клубами черного дыма. При пожарах нефтяных фонтанов только незначительная часть нефти успевает испариться и сгореть в воздухе, а большая ее часть выпадает на землю, разливается вокруг устья и продолжает гореть. Нефтяной фонтан горит оранжевым пламенем с выделением большого количества черного дыма.

Для расчета длины факела газового фонтана можно использовать эмпирическую формулу

$$H_{\phi} = 20\sqrt{D}, \quad (9.1)$$

где D – расход газа (дебит фонтана), млн м³/сут., определяемый как

$$D \approx 0,0025 \cdot H_{\phi}^2. \quad (9.2)$$

Режим истечения газовой струи может быть определен сравнением эффективной скорости истечения ($V_{\text{э}}$) со скоростью звука (V_0)

$$V_{\text{э}} = \frac{4V_{\text{г}}}{\pi d^2}, \quad (9.3)$$

где $V_{\text{г}}$ – секундный расход газа, м³/с;

d – диаметр устья скважины, м.

Скорость звука в метане (V_0) составляет 430 м/с.

Для расчета адиабатической (T_a) и действительной (T_d) температур горения необходимо определить теплоту сгорания, т.е. количество тепла, выделяемое при полном сгорании единицы количества горючего материала, в рассматриваемом случае с учетом состава газового фонтана.

Теоретическая (адиабатическая) температура горения достигается при полном и адиабатическом сгорании газообразного вещества, т.е. все тепло, выделившееся при горении, идет на нагрев.

Остановимся на методике ее расчета, основываясь на анализе энергетического баланса химической реакции. Тепловой эффект реакции можно рассчитывать как с использованием стандартных мольных теплот образования, так и стандартных мольных теплот их сгорания. Обычно используются стандартные мольные теплоты образования исходных веществ и продуктов реакции.

Если первоначальная температура сжигаемого вещества равна T_0 , а температура прочих веществ (например, кислорода и различных газов) равна T_1 , T_2 и т.д., то допустив, что исходные вещества имеют температуру 273,15 К, будем иметь:

$$\sum \int_{273}^{T_a} (C_p)_{\text{исх}} dT + \Delta_f H_{273}^0 = \sum \int_{273}^{T_a} (C_p)_{\text{прод}} dT \quad (9.4)$$

где $(C_p)_{\text{исх}}$ – теплоемкость исходных веществ;

$(C_p)_{\text{прод}}$ – теплоемкость продуктов (в том числе и возможного избытка кислорода);

T_a – теоретическая температура горения, т.е. адиабатическая.

Для упрощения можно воспользоваться вместо величины $\Delta_f H^\circ_{273}$ значением стандартной энтальпии образования при 298,15 К – $\Delta_f H^\circ_{298}$ и вместо истинных теплоемкостей реагентов их средними значениями, причем в качестве нижнего предела можно брать $T = 298,15$ К.

Химические реакции, сопровождающиеся выделением теплоты, называются *экзотермическими*, а реакции, которые проходят с поглощением теплоты, *эндотермическими*.

Стандартная энтальпия образования простых веществ, например кислорода в стандартных состояниях равна нулю при любой температуре. Значения теплот образования органических соединений можно найти в справочной литературе или рассчитать, используя первое следствие из закона Гесса, которое гласит:

Тепловой эффект реакции равен сумме энтальпий образования продуктов реакции за вычетом суммы энтальпий образования исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов.

Используя справочную литературу для нахождения теплот (энтальпий) образования веществ и проводя различные расчеты, необходимо помнить, что тепловой эффект реакции $\Delta_r H$ и теплота, выделяющаяся при сгорании Q_T имеют одинаковые численные значения по абсолютной величине, но разный знак, т.е. $Q = -\Delta_r H^\circ_T$.

Различают низшую и высшую теплоту сгорания.

Высшей теплотой сгорания Q_v называют количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг или 1 м³ горючего вещества при условии, что вода выделяется в конденсированном состоянии.

Низшей теплотой сгорания Q_n называют количество теплоты, выделяемое при полном сгорании 1 кг или 1 м³ горючего вещества при условии, что вода выделяется в виде пара.

В пожарно-технических расчетах обычно используют низшую теплоту сгорания, так как на пожарах вода находится в парообразном состоянии.

Низшая теплота сгорания смеси газов определяется по формуле

$$Q_n^{\text{см}} = \sum Q_{ni} \cdot a_i, \quad (9.5)$$

где Q_{ni} – низшая теплота сгорания i -го горючего компонента;
 a_i – объемная доля i -го компонента горючей смеси.

Значение Q_H следует подставлять в кДж/м³ (24,45 л – объем 1 моля газа при 298 К).

После интегрирования уравнения (9.4) получается выражение для адиабатической температуры горения:

$$T_a = T_0 + \frac{Q_H^{CM}}{\sum_i v_i \cdot C_{p,пр}} =$$

$$= T_0 + \frac{Q_H^{CM}}{v_{CO_2} \cdot C_{p,CO_2} + v_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O} + v_{N_2} \cdot C_{p,N_2} + v_{SO_2} \cdot C_{p,SO_2}},$$
(9.6)

где v – число молей продуктов горения CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 .

Действительная температура (T_d) горения всегда ниже адиабатической (T_a), так как часть тепла теряется на излучение. При расчете действительной температуры горения учитываются потери тепла в результате химического недожога в зоне горения, когда образуются продукты неполного горения (CO , C , C_nH_m и др.) и потеря тепла излучением факела пламени:

$$\eta = \eta_x + \eta_l,$$
(9.7)

где η – общие теплотери при горении факела пламени (доля от низшей теплоты сгорания Q_H);

η_x – химический недожог;

η_l – теплотери излучением пламени.

Теплотери излучением пламени равны *коэффициенту излучения пламени* η_l (представляет собой долю теплоты сгорания, теряемую в виде лучистой энергии в окружающую среду), который для углеводородных горючих находится по формуле:

$$\eta_l = 0,05\sqrt{M},$$
(9.8)

где M – средняя молярная масса компонентов горючей смеси, равная

$$M = \sum M_i \cdot a_i,$$
(9.9)

где M_i – молярная масса i -го компонента горючей смеси;

ϕ_i – объемная доля i -го компонента горючей смеси.

Действительная температура горения газового фонтана будет равна:

$$T_{\text{д}} = T_0 + \frac{Q_{\text{н}}^{\text{см}}(1-\eta)}{\sum_i v_i \cdot C_{p,\text{пр}}} \quad (9.10)$$

Факел фонтана служит источником теплового излучения, что является одним из серьезных препятствий при борьбе с пожаром фонтана.

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

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot v_{\text{м}}^{\text{абс}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{см}}, \quad (9.11)$$

Для газовых фонтанов коэффициент $\beta \approx 1$, скорость сгорания равна секунднему расходу газа $v_{\text{г}}$. Следовательно

$$q_{\text{п}} = v_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{см}}. \quad (9.12)$$

При расчетах принимается, что источником излучения пламени фонтана является точка, расположенная в его геометрическом центре, – т.е. на высоте $H_{\text{ф}}/2$ от устья скважины (рис. 9.2).

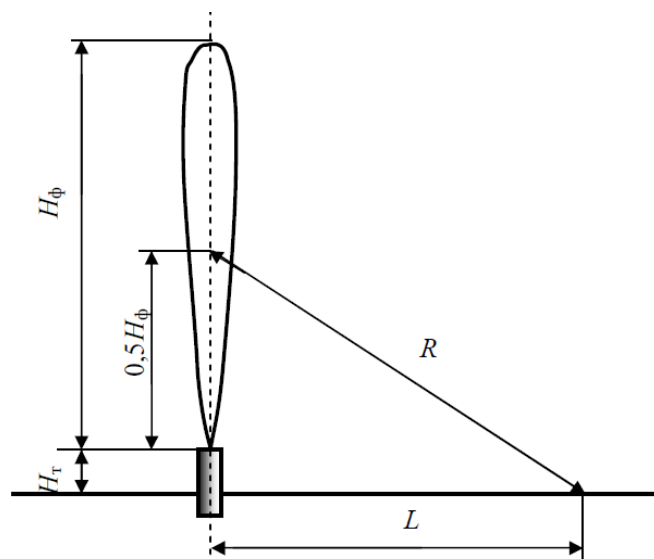


Рис. 9.2. Схема для расчета безопасного расстояния от факела пламени газового фонтана

Интенсивность излучения компактного $q_{\text{л}}$ вертикального газового фонтана в безветренную погоду может быть рассчитана по формуле:

$$q_{\text{л}} = \frac{\eta_{\text{л}} \cdot q_{\text{п}}}{4\pi R^2}, \text{ Вт/м}^2, \quad (9.13)$$

где $\eta_{\text{л}}$ – коэффициент излучения пламени;

R – расстояние от центра фонтана до рассматриваемой точки на поверхности земли, м (рис. 9.2).

Очевидно, что соответствующее расстояние от центра фонтана до рассматриваемой точки на поверхности земли:

$$R^2 = L^2 + (0,5H_{\text{ф}} + H_{\text{т}})^2. \quad (9.14)$$

Тогда

$$q_{\text{л}} = \frac{\eta_{\text{л}} \cdot q_{\text{п}}}{4\pi [L^2 + (0,5H_{\text{ф}} + H_{\text{т}})^2]}. \quad (9.15)$$

По уравнению (9.15) строится график зависимости $q = f(L)$, для чего задаются значения $L = 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120$ м и т.д.

По графику определяются:

– расстояние, на котором личный состав может работать длительное время в боевой одежде и в касках с защитными щитками без специального теплозащитного снаряжения. Граница этой зоны определяется по мощности теплового потока – $4,2 \text{ кВт/м}^2$ (температура $60\text{--}70 \text{ }^\circ\text{C}$);

– расстояние, на котором личный состав может вести боевую работу в течение не более 5 мин в специальном теплозащитном снаряжении под защитой распыленных водяных струй. Граница зоны определяется мощностью теплового потока в 14 кВт/м^2 .

Заполняется итоговая табл. 9.1.

Таблица 9.1

Результаты расчета

Параметры фонтана		Параметры пожара				
Дебит, млн м ³ /сут.	Режим истечения газа	Температура горения, К		Теплота пожара, кВт	Расстояние, м, при	
		адиабати- ческая	действи- тельная		4,2 кВт/м ²	14 кВт/м ²

Пример 1.

Используя характеристики компактного газового фонтана состава: 85 % метана, 9 % этана, 3 % пропана, 2 % азота и 1 % сероводорода, истекающего через устье диаметром $d = 100$ мм и имеющего высоту факела пламени $H_{\phi} = 35$ м, высота скважины 1 м; химический недожог в зоне горения составляет $\eta_x = 0,1$ от низшей теплоты сгорания, рассчитать следующие параметры горения:

- 1) дебит газового фонтана D (млн м³/сутки);
- 2) режим истечения газовой струи;
- 3) адиабатическую температуру горения T_a , К;
- 4) действительную температуру горения T_d , К;
- 5) теплоту пожара q_n , кВт;
- 6) изменение интенсивности лучистого теплового потока в зависимости от расстояния до устья скважины q , кВт/м²;
- 7) определить безопасное расстояние от устья скважины, h_6 , м/

Решение.

1. Дебит газового фонтана (D , млн м³/сутки) может быть рассчитан по высоте факела пламени по формуле (9.2):

$$D = 0,0025H_{\phi}^2 = 0,0025 \cdot 35^2 = 3,0625 \text{ млн м}^3/\text{сут.}$$

Секундный расход газа составит:

$$v_r = 3,0625 \cdot 10^6 / (24 \cdot 60 \cdot 60) = 35,45 \text{ м}^3/\text{с.}$$

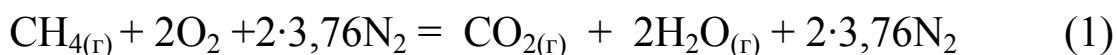
2. Режим истечения газовой струи может быть определен сравнением эффективной скорости истечения (V_3) со скоростью звука (V_0) по формуле (9.4)

$$V_3 = \frac{4V_r}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 35,45}{3,14 \cdot 0,1^2} = 4515 \text{ м/с.}$$

Скорость звука в метане (V_0) составляет 430 м/с, т.е. скорость истечения газовой струи превышает скорость звука.

3. Для расчета адиабатической (T_a) температуры горения необходимо определить теплоту сгорания газовой смеси.

Рассчитывается низшая теплота сгорания ($-\Delta_r H_{T=Q_H}^0$) метана, этана, пропана и сероводорода, опираясь на следствие из закона Гесса. Реакции горения этих веществ:



$$\begin{array}{l} \Delta_f H^\circ_{298}, \\ \text{кДж/моль} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -74,85 & 0 & \\ & & -393,51 \quad -241,81 \end{array}$$

Тогда низшая теплота сгорания метана равна:

$$Q_{\text{н}} = -\{ \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CO}_2) + 2 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CH}_4) \} = \\ = -\{ (-393,51) + 2(-241,81) - (-74,85) \} = 802,29 \text{ кДж/моль.}$$

Теплота сгорания 1 м³ метана будет равна

$$\frac{Q_{\text{н}} \cdot 1000}{24,45} = \frac{802,29 \cdot 1000}{24,45} = 32813,5 \text{ кДж/м}^3.$$



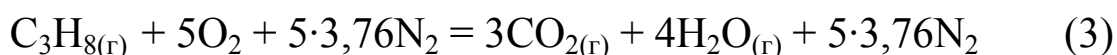
$$\begin{array}{l} \Delta_f H^\circ_{298}, \\ \text{кДж/моль} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -84,67 & 0 & \\ & & -393,51 \quad -241,81 \end{array}$$

Низшая теплота сгорания этана составит:

$$Q_{\text{н}} = -\{ 2 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CO}_2) + 3 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^\circ_{298}(\text{C}_2\text{H}_6) \} = \\ = -\{ 2(-393,51) + 3(-241,81) - (-84,67) \} = 1427,78 \text{ кДж/моль.}$$

По аналогии с метаном теплота сгорания 1 м³ этана будет равна

$$\frac{Q_{\text{н}} \cdot 1000}{24,45} = \frac{1427,78 \cdot 1000}{24,45} = 58395,91 \text{ кДж/м}^3.$$



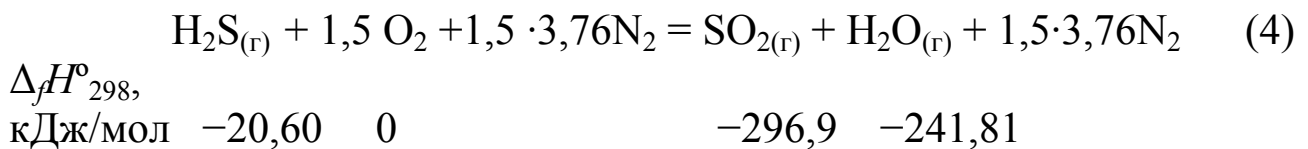
$$\begin{array}{l} \Delta_f H^\circ_{298}, \\ \text{кДж/моль} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} -103,85 & 0 & \\ & & -393,51 \quad -241,81 \end{array}$$

Низшая теплота сгорания пропана составит:

$$Q_{\text{н}} = -\{ 3 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CO}_2) + 4 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^\circ_{298}(\text{C}_3\text{H}_8) \} = \\ = -\{ 3(-393,51) + 4(-241,81) - (-103,85) \} = 2043,92 \text{ кДж/моль.}$$

Теплота сгорания 1 м³ пропана будет равна

$$\frac{Q_{\text{н}} \cdot 1000}{24,45} = \frac{2043,92 \cdot 1000}{24,45} = 83595,91 \text{ кДж/м}^3.$$



Низшая теплота сгорания сероводорода составит

$$Q_H = -\{ \Delta_f H^\circ_{298}(\text{SO}_2) + \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{S}) \} =$$

$$= -\{ (-296,9) + (-241,81) - (-20,6) \} = 518,11 \text{ кДж/моль.}$$

Теплота сгорания 1 м³ сероводорода будет равна

$$\frac{Q_H \cdot 1000}{24,45} = \frac{518,11 \cdot 1000}{24,45} = 21190,59 \text{ кДж/м}^3.$$

Поскольку в 1 м³ исходной газовой смеси содержится 85 об. % (0,85) метана, 9 об. % (0,09) этана, 3 об. % (0,03) пропана и 1 об. % (0,01) сероводорода, то общая теплота сгорания 1 м³ смеси составит:

$$Q_H^{\text{см}} = 32813,5 \cdot 0,85 + 58395,91 \cdot 0,09 + 83595,91 \cdot 0,03 +$$

$$+ 21190,59 \cdot 0,01 = 35866,89 \text{ кДж/м}^3.$$

Определяется объем (V) и число молей (ν) продуктов горения газообразной смеси, содержащей 85 об.% (φ_{CH_4}) метана, 9 об.% ($\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}$) этана, 3 об. % ($\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8}$) пропана и 1 об. % ($\varphi_{\text{H}_2\text{S}}$) сероводорода по реакциям (1)–(4), учитывая, что смесь содержит дополнительно 2 об.% (φ_{N_2}) азота:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{\nu_{\text{CO}_2}}{\nu_{\text{CH}_4}} \cdot \frac{\varphi_{\text{CH}_4}}{100} + \frac{\nu_{\text{CO}_2}}{\nu_{\text{C}_2\text{H}_6}} \cdot \frac{\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6}}{100} + \frac{\nu_{\text{CO}_2}}{\nu_{\text{C}_3\text{H}_8}} \cdot \frac{\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8}}{100} =$$

$$= \frac{1}{1} \cdot \frac{85}{100} + \frac{2}{1} \cdot \frac{9}{100} + \frac{3}{1} \cdot \frac{3}{100} = 1,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$\text{или } \nu_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{0,02445} = \frac{1,12}{0,02445} = 45,81 \text{ моль/м}^3;$$

$$\begin{aligned}
 V_{H_2O} &= \frac{v_{H_2O}}{v_{CH_4}} \cdot \frac{\varphi_{CH_4}}{100} + \frac{v_{H_2O}}{v_{C_2H_6}} \cdot \frac{\varphi_{C_2H_6}}{100} + \frac{v_{H_2O}}{v_{C_3H_8}} \cdot \frac{\varphi_{C_3H_8}}{100} + \\
 &+ \frac{v_{H_2O}}{v_{H_2S}} \cdot \frac{\varphi_{H_2S}}{100} = \\
 &= \frac{2}{1} \cdot \frac{85}{100} + \frac{3}{1} \cdot \frac{9}{100} + \frac{4}{1} \cdot \frac{3}{100} + \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{100} = 2,1 \text{ м}^3/\text{м}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{или } v_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{0,02445} = \frac{2,1}{0,02445} = 85,89 \text{ моль}/\text{м}^3;$$

$$V_{SO_2} = \frac{v_{SO_2}}{v_{H_2S}} \cdot \frac{\varphi_{H_2S}}{100} = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{100} = 0,01 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$\text{или } v_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{0,02445} = \frac{0,01}{0,02445} = 0,41 \text{ моль}/\text{м}^3;$$

$$\begin{aligned}
 V_{N_2} &= \frac{v_{N_2}}{v_{CH_4}} \cdot \frac{\varphi_{CH_4}}{100} + \frac{v_{N_2}}{v_{C_2H_6}} \cdot \frac{\varphi_{C_2H_6}}{100} + \frac{v_{N_2}}{v_{C_3H_8}} \cdot \frac{\varphi_{C_3H_8}}{100} + \\
 &+ \frac{v_{N_2}}{v_{H_2S}} \cdot \frac{\varphi_{H_2S}}{100} + \frac{\varphi_{N_2}}{100} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2 \cdot 3,76}{1} \cdot \frac{85}{100} + \frac{3,5 \cdot 3,76}{1} \cdot \frac{9}{100} + \frac{5 \cdot 3,76}{1} \cdot \frac{3}{100} + \\
 &+ \frac{1,5 \cdot 3,76}{1} \cdot \frac{1}{100} + \frac{2}{100} = 8,22 \text{ м}^3/\text{м}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{или } v_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{0,02445} = \frac{8,22}{0,02445} = 336,07 \text{ моль}/\text{м}^3.$$

Суммарный объем продуктов горения составит:

$$1,12 + 2,1 + 0,01 + 8,22 = 11,45 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$\text{или } 45,81 + 85,89 + 0,41 + 336,07 = 468,18 \text{ моль}/\text{м}^3.$$

Для расчета адиабатической температуры горения по формуле (9.6) можно воспользоваться следующими средними значениями теплоемкостей при температуре 298–2000 К: $C_{p,CO_2} = 53,14$, $C_{p,H_2O} = 42,34$, $C_{p,N_2} = 32,76$, $C_{p,SO_2} = 52,57$ Дж/(моль·К).

$$T_a = T_0 + \frac{Q_n}{v_{CO_2} \cdot C_{p,CO_2} + v_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O} + v_{N_2} \cdot C_{p,N_2} + v_{SO_2} \cdot C_{p,SO_2}} =$$
$$= 298 + \frac{35866,89 \cdot 10^3}{45,81 \cdot 53,14 + 85,89 \cdot 42,34 + 336,07 \cdot 32,76 + 0,41 \cdot 52,57} = 2395 \text{ К}$$

4. Рассчитывается действительная (T_d) температура горения газовой смеси. Молярная масса метана – 16, этана – 30, пропана – 44, азота – 28; сероводорода – 34 г/моль.

Средняя молярная масса компонентов смеси, рассчитываемая по формуле (9.9), равна

$$M = 0,85 \cdot 16 + 0,09 \cdot 30 + 0,03 \cdot 44 + 0,02 \cdot 28 + 0,01 \cdot 34 = 18,52 \text{ кг/кмоль}.$$

Коэффициент излучения в соответствии с формулой (9.8) равен

$$\eta_{л} = 0,05 \sqrt{18,52} = 0,215.$$

Тогда потеря тепла излучением факела пламени:

$$\eta = \eta_x + \eta_{л} = 0,1 + 0,215 = 0,315.$$

Действительная температура горения газового фонтана по формуле (9.10) будет равна:

$$T_d = T_0 + \frac{Q_n(1-\eta)}{\sum_i v_i \cdot C_{p,пг}} =$$
$$= 298 + \frac{35866,89 \cdot 10^3 \cdot (1-0,315)}{45,81 \cdot 53,14 + 85,89 \cdot 42,34 + 336,07 \cdot 32,76 + 0,41 \cdot 52,57} = 1730 \text{ К}$$

5. Теплота пожара данного фонтана

$$q_{\text{п}} = 35,45 \cdot 35866,89 = 1271481 \text{ кВт} = 1271,5 \text{ МВт.}$$

6. По уравнению (9.15) строится график зависимости $q = f(L)$, для чего задаются значения $L = 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 100$ м.

Проведенные расчеты приведены в табл. 9.2 и на рис. 9.3.

Таблица 9.2

Результаты расчета

$L, \text{ м}$	10	20	40	60	70	80	100
$q_{\text{л}}, \text{ кВт/м}^2$	49,21	29,32	11,21	5,52	4,15	3,23	2,10

7. Построив график зависимости $q_{\text{л}} = f(L)$, устанавливается, что:

1) расстояние, на котором личный состав может работать длительное время в боевой одежде и в касках с защитными щитками без специального теплозащитного снаряжения, которое определяется по мощности теплового потока, составляющего величину $4,2 \text{ кВт/м}^2$, равно $69,5$ м от устья скважины фонтанирующего газа;

2) расстояние, на котором личный состав может вести боевую работу в течение не более 5 мин в специальном теплозащитном снаряжении под защитой распыленных водяных струй, определяемое мощностью теплового потока в 14 кВт/м^2 , составляет $34,5$ м.

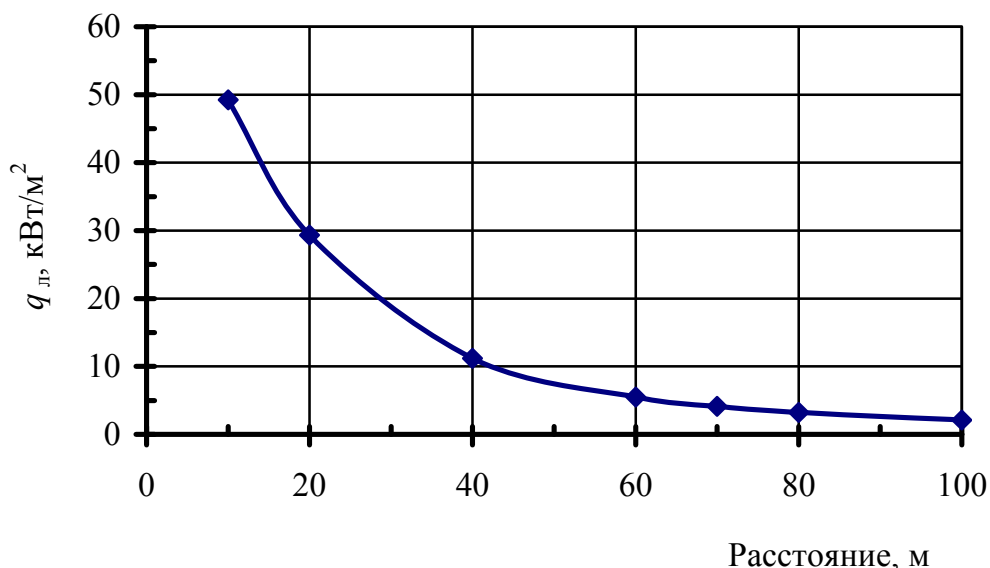


Рис. 9.3. Зависимость изменения мощности излучения факела пламени фонтана от расстояния до устья скважины

Заполняется итоговая табл. 9.3.

Таблица 9.3

Итоговая таблица

Параметры фонтана		Параметры пожара				
Дебит, млн м ³ /сут.	Режим истечения газа	Температура горения, К		Теплота пожара, кВт	Расстояние, м, при	
		адиабатическая	действительная		4,2 кВт/м ²	14 кВт/м ²
3,06	Сверхзвуковой	2395	1730	1271481	69,5	34,5

Задания для самостоятельной работы

Компактный газовый фонтан состава (табл. 9.4), истекающий через устье диаметром d , мм, имеет высоту факела пламени $H_{\text{ф}}$, м, высота скважины $H_{\text{т}} = 1$ м. Химический недожог в зоне горения составляет $\eta_{\text{х}}$ от низшей теплоты сгорания. Рассчитать следующие параметры:

- 1) дебит газового фонтана D (млн м³/сутки);
- 2) режим истечения газовой струи;
- 3) адиабатическую и действительную температуру горения, $T_{\text{а}}$, $T_{\text{д}}$, К;
- 4) теплоту пожара $q_{\text{п}}$, кВт;
- 5) изменение интенсивности лучистого теплового потока в зависимости от расстояния до устья скважины q , кВт/м².

Таблица 9.4

Исходные данные

Вар.	$H_{\text{ф}}$, м	Содержание компонентов, % об.						Химический недожог $\eta_{\text{х}}$	Диаметр устья d , мм
		Метан	Этан	Пропан	Диоксид углерода	Азот	Сероводород		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1	20	92	3		3	2		0,05	125
2	48	87	3	2		8		0,08	160
3	13	85	5	4			6	0,14	100
4	24	92		3	2		3	0,06	200
5	35	82	10	4		4		0,09	185
6	27	85	5	6			4	0,12	140
7	19	87	2	3		8		0,07	105
8	29	87	5	3			5	0,11	150

Окончание табл. 9.4

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
9	44	93		2	3	2		0,10	210
10	33	81	6		4		9	0,14	170
11	20	91	3		4	2		0,11	220
12	19	92		3		3	2	0,12	230
13	50	84	7		4	5		0,07	190
14	28	80	10	2		5	3	0,11	155
15	15	93	2		3	2		0,06	245
16	45	85	5	5			5	0,08	120
17	34	93	2		4	1		0,15	235
18	37	86	6	2			6	0,10	215
19	25	92	4	2		2		0,13	175
20	29	92		4	3		1	0,06	250
21	47	88		6		3	3	0,08	135
22	13	89	4	2		5		0,09	240
23	35	86	7		2		5	0,07	165
24	45	83	9	4			4	0,13	195
25	37	91	4		1	4		0,05	225
26	38	82	8	2		3	5	0,10	110
27	14	80	10			5	5	0,15	180
28	49	85	12	2			1	0,05	145
29	21	90		6	2	2		0,12	205
30	24	86	6			5	3	0,09	130

10. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГАЗООБМЕНА НА ВНУТРЕННЕМ ПОЖАРЕ

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.

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 $h_{нз}$.

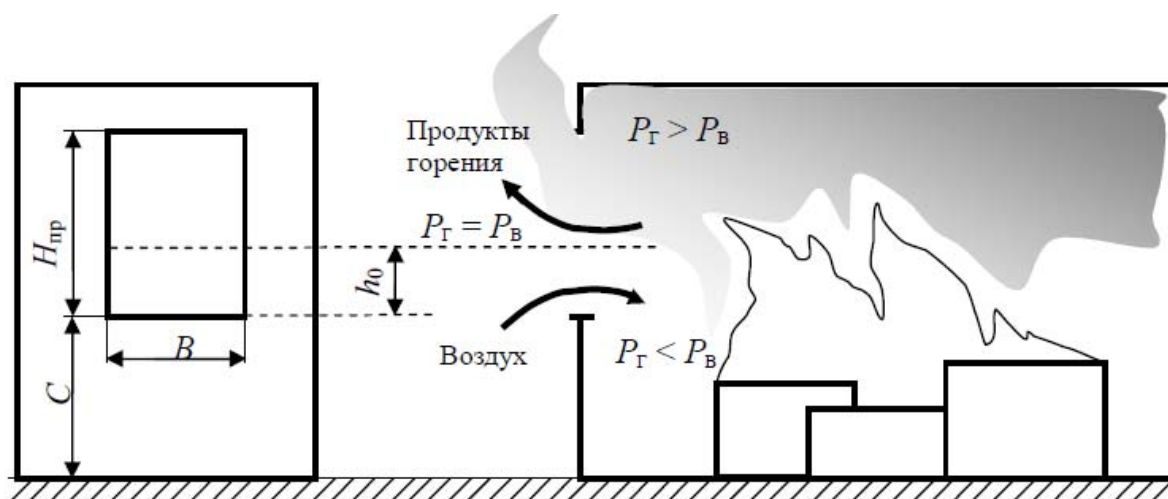


Рис. 10.1. Газообмен на внутреннем пожаре

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

При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одинаковом расстоянии от пола, величину h_0 рассчитывают по формуле (при условии, что в большинстве случаев при горении в ограждении давление изменяется незначительно, поэтому можно считать, что плотность газа обратно пропорциональна его температуре):

$$h_0 = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{пр}}} + 1}} = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{в}}} + 1}}, \quad (10.1)$$

где $H_{\text{пр}}$ – высота проема, м;

$\rho_{\text{пр}}$ – плотность продуктов горения, кг/м³;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³;

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

При наличии в помещении двух проемов, расположенных на различной высоте помещения, положение нейтральной зоны будет зависеть от соотношения их площадей.

Расстояние до нейтральной зоны от центра нижнего проема h_1 , рассчитывается по формуле:

$$h_1 = \frac{L}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \cdot \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{пр}}} + 1} = \frac{L}{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \cdot \frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{в}}} + 1}, \quad (10.2)$$

где L – расстояние между центрами нижнего и верхнего проемов, м;

S_1, S_2 – площади нижнего и верхнего проемов, соответственно, м².

Плотность воздуха и продуктов горения можно рассчитать по формулам:

$$\rho_{\text{в}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{P}{T_{\text{в}}}, \quad (10.3)$$

$$\rho_{\text{пр}} = 12 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{P}{T_{\text{ос}}} \cdot \frac{\sum (M_{\text{пр}i} \cdot n_{\text{пр}i})}{\sum n_{\text{пр}i}}, \quad (10.4)$$

где P и $T_{\text{ос}}$ – давление (Па) и температура (К) окружающей среды;

$M_{\text{пр}i}$ – молярная масса i -го продукта горения, кг/кмоль;

$n_{\text{пр}i}$ – коэффициенты в уравнении реакции горения перед i -ми продуктами горения.

Теоретический расход воздуха $G_{\text{в}}^0$, кг/с, – расход воздуха, необходимый для полного сгорания материала с данной массовой скоростью:

$$G_B^0 = v_M^{\text{пр}} \cdot S_{\text{п}} \cdot V_B^0 \cdot \rho_B, \quad (10.5)$$

где $v_M^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с);

$S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м²;

V_B^0 – теоретический объем воздуха, необходимый для горения, м³/кг;

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³.

Теоретический объем воздуха V_B^0 , м³/кг, находится по формуле

$$V_B^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_0}{n_{\text{Г}} M_{\text{Г}}}, \quad (10.6)$$

где n_{O_2} , n_{N_2} , $n_{\text{Г}}$ – количество кислорода, азота и горючего, получаемого из уравнения химической реакции горения, кмоль;

$M_{\text{Г}}$ – молекулярная масса горючего;

V_0 – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях (22,4 м³).

Фактический расход воздуха G_B^{ϕ} , кг/с, – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени.

Фактический расход воздуха зависит от высоты ($H_{\text{пр}}$), площади проема ($S_{\text{пр}}$) и коэффициента сопротивления проема (μ).

При газообмене через один проем или несколько проемов, расположенных на одном уровне:

$$G_B^{\phi} = \frac{2}{3} \mu \cdot B \cdot h_0 \sqrt{2gh_0 \rho_B (\rho_B - \rho_{\text{пг}})}, \quad (10.7)$$

где μ – коэффициент сопротивления проема ($\mu = 0,6 - 0,7$);

B – ширина проема, м;

h_0 – высота ПРД относительно нижней отметки проема, м;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²;

ρ_B – плотность воздуха, кг/м³;

$\rho_{\text{пг}}$ – плотность продуктов горения, кг/м³.

Коэффициент избытка воздуха α на внутреннем пожаре – отношение фактического расхода воздуха к требуемому:

$$\alpha = \frac{G_B^{\phi}}{G_B^0}. \quad (10.8)$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода φ_{O_2} соотношением:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}. \quad (10.9)$$

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).

При горении штабеля древесины режим пожара можно определить по параметру Φ :

$$\Phi = \frac{\rho_v S_{пр} \sqrt{gH_{пр}}}{S_{гор}}, \quad (10.10)$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 $S_{пр}$ – площадь проема, м²;
 $H_{пр}$ – высота проема, м;
 $S_{гор}$ – площадь поверхности горения, м².

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.

Пример 1.

Определить положение плоскости равных давлений относительно пола при пожаре в помещении, если температура наружного воздуха 20 °С, температура пожара 460 °С, высота оконного проема равна 1,5 м, расстояние от пола до подоконника 1 м.

Решение.

Высота нейтральной зоны относительно нижней отметки проема находится по формуле (10.1):

$$h_0 = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{в}}} + 1}} = \frac{1,5}{\sqrt[3]{\frac{460 + 273}{20 + 273} + 1}} = 0,64 \text{ м.}$$

Высота плоскости равных давлений относительно пола

$$h_{\text{ПРД}} = h_0 + C = 0,64 + 1 = 1,64 \text{ м.}$$

Пример 2.

Определить среднеобъемную концентрацию кислорода в продуктах горения, если фактический расход воздуха, поступающего в помещение, равен 1,4 кг/с, теоретический – 0,45 кг/с.

Решение.

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой (10.9), из которой можно выразить концентрацию кислорода

$$\varphi_{\text{O}_2} = 21 - \frac{21}{\alpha}.$$

Коэффициент избытка воздуха α при наличии газообмена помещения с окружающей средой определяется по формуле (10.7):

$$\alpha = \frac{1,8}{0,6} = 3,$$

$$\varphi_{\text{O}_2} = 21 - \frac{21}{3} = 14\% \text{ об.}$$

Пример 3.

Определить площадь пожара $S_{\text{п}}$ в помещении, при которой среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 16 %. Фактический расход поступающего воздуха $G_{\text{в}}^{\phi}$ составляет 1,8 кг/с, приведенная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{уд}}$ равна 0,05 кг/(м²·с), теоретический объем воздуха $V_{\text{в}}^0 = 4,5$ м³/кг, плотность воздуха $\rho_{\text{в}} = 1,2$ кг/м³.

Решение.

Теоретический расход воздуха $G_{\text{в}}^0$ определяется по формуле (10.5), откуда площадь пожара равна:

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

С учетом коэффициента избытка воздуха (10.7)

$$S_{\text{п}} = \frac{G_{\text{в}}^{\phi}}{\alpha \cdot v_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot \rho_{\text{в}}}.$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2}} = \frac{21}{21 - 15} = 4,2.$$

Тогда площадь пожара равна

$$S_{\text{п}} = \frac{1,8}{4,2 \cdot 0,05 \cdot 4,5 \cdot 1,2} = 1,59 \text{ м}^2.$$

Пример 4.

Рассчитать теоретический расход воздуха при горении в помещении ацетона в емкости диаметром 3 м, если удельная массовая скорость выгорания 0,06 кг/(м²·с). Температура окружающей среды 15 °С, давление нормальное (101325 Па).

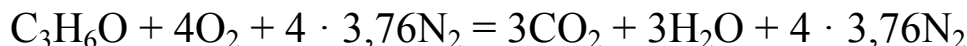
Решение.

Площадь емкости составляет

$$S_{\text{п}} = \pi r^2 = 3,14(3/2)^2 = 7,065 \text{ м}^2.$$

Состав воздуха условно принимается постоянным, содержащим 21 % по объему кислорода и 79 % азота, т.е. на один объем кислорода приходится 3,76 объема азота. Или на 1 моль кислорода 3,76 моля азота.

Уравнение реакции горения ацетона



Теоретическое количество воздуха находится по формуле (10.6)

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_0}{n_{\text{г}} M_{\text{г}}} = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76) \cdot 22,4}{1 \cdot 58} = 7,35 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Плотность воздуха для данных условий согласно формуле (10.3) составит

$$\rho_{\text{в}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} = 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{101325}{288} = 1,22 \text{ кг/м}^3.$$

Теоретический расход воздуха, рассчитанный по формуле (10.5), равен

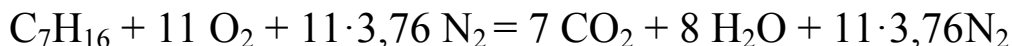
$$G_{\text{в}}^0 = v_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot S_{\text{п}} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot \rho_{\text{в}} = 0,06 \cdot 7,35 \cdot 1,766 \cdot 1,29 = 3,8 \text{ кг/с}.$$

Пример 5.

Рассчитать фактический расход воздуха через дверной проем размером 1,2×2,3 м и определить положение плоскости равных давлений (ПРД), если в помещении в резервуаре горит гептан. Коэффициент сопротивления проема $\mu = 0,65$. Среднеобъемная температура внутри помещения составляет 85 °С, температура окружающей среды – 25 °С, давление – нормальное (101325 Па).

Решение.

Реакция горения гептана:



Для нахождения плотности продуктов горения необходимо воспользоваться формулой (10.4). Молярные массы диоксида углерода, воды и азота соответственно равны 44, 18 и 28 кг/кмоль.

Плотность смеси продуктов горения равна

$$\rho_{\text{пр}} = 12 \cdot 10^{-5} \frac{P}{T_{\text{oc}}} \cdot \frac{\sum (M_{\text{пр}i} \cdot n_{\text{пр}i})}{\sum n_{\text{пр}i}} =$$
$$= 12 \cdot 10^{-5} \frac{101325}{273 + 85} \cdot \frac{7 \cdot 44 + 8 \cdot 18 + 11 \cdot 3,76 \cdot 28}{7 + 8 + 11 \cdot 3,76} = 0,97 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность воздуха для данных условий согласно формуле (10.3) составит

$$\rho_{\text{в}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} = 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{101325}{273 + 25} = 1,18 \text{ кг/м}^3.$$

Высота плоскости равных давлений находится по формуле (10.1):

$$h_0 = \frac{H_{\text{пр}}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{пр}}} + 1}} = \frac{2,3}{\sqrt[3]{\frac{1,18}{0,97} + 1}} = 1,11 \text{ м.}$$

Фактический расход воздуха при газообмене через один проем рассчитывается по формуле (10.7):

$$G_{\text{в}}^{\phi} = \frac{2}{3} \mu \cdot B \cdot h_0 \sqrt{2gh_0 \rho_{\text{в}} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{пр}})} =$$
$$= \frac{2}{3} \cdot 0,65 \cdot 1,2 \cdot 1,11 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,11 \cdot 1,18 (1,18 - 0,97)} = 3,61 \text{ кг/с.}$$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить положение плоскости равных давлений относительно пола при пожаре в помещении, если температура наружного воздуха 15 °С, температура пожара 600 °С, высота оконного проема равна 1,7 м, расстояние от пола до подоконника 1,2 м.

2. Оценить среднеобъемную температуру газовой среды внутри помещения, если газообмен протекает через один дверной проем, высотой 2,2 м. Высота плоскости равных давлений 1,3 м, температура воздуха составляет 15 °С.

3. Определить среднеобъемную концентрацию кислорода в продуктах горения, если фактический расход воздуха, поступающего в помещение, равен 2,4 кг/с, теоретический – 0,6 кг/с.

4. Определить площадь пожара в помещении, при которой среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 16 %. Фактический расход поступающего воздуха составляет 2 кг/с, удельная массовая скорость выгорания равна 0,03 кг/(м²·с), теоретический объем воздуха 3 м³/кг, температура воздуха 18 °С.

5. Найти теоретический объем воздуха при пожаре в помещении, если среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигает 17 %. Фактический расход поступающего воздуха составляет 1,7 кг/с, удельная массовая скорость выгорания равна 0,05 кг/(м²·с), площадь пожара 10 м², температура воздуха 25 °С.

6. Найти удельную массовую скорость выгорания при пожаре в помещении, если среднеобъемная концентрация кислорода в продуктах горения достигает 13 %. Фактический расход поступающего воздуха составляет 4 кг/с, площадь пожара 20 м², температура воздуха 15 °С.

7. Рассчитать теоретический расход воздуха при горении в помещении 2-метилбутана в емкости диаметром 3 м, если удельная массовая скорость выгорания 0,05 кг/(м²·с). Температура воздуха 10 °С, давление нормальное (101325 Па).

8. Рассчитать требуемый расход воздуха при горении в помещении пентанола-2 в емкости диаметром 2 м, если удельная массовая скорость выгорания 0,07 кг/(м²·с). Температура воздуха 20 °С, давление нормальное (101325 Па).

9. Рассчитать значение параметра, для которого в табл. 10.1 указано «найти». Атмосферное давление нормальное (101325 Па).

Условные обозначения:

$t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;

$S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м²;

$v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с);

$V_{\text{в}}^0$ – теоретический объем воздуха, м³/кг;

$G_{\text{в}}^{\text{ф}}$ – фактический расход воздуха, кг/с;

α – коэффициент избытка воздуха;

φ_{O_2} – концентрация кислорода в продуктах горения, % (об.).

10. В помещении в емкости диаметром d горит вещество X (табл. 10.2). Приведенная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{пр}}$. Температура воздуха $t_{\text{в}}$, среднеобъемная температура в помещении $t_{\text{ср}}$. Атмосферное давление нормальное (101325 Па). Коэффициент

сопротивления проема $\mu = 0,65$, высота проема $H_{пр}$, ширина проема B .
 Рассчитать высоту плоскости равных давлений, теоретический
 и фактический расход воздуха.

Таблица 10.1

Исходные данные

Вар.	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$\nu_{м}^{пр}, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$V_{в}^0, \text{м}^3/\text{кг}$	$S_{п}, \text{м}^2$	$G_{в}^{\phi}, \text{кг}/\text{с}$	α	$\varphi_{\text{O}_2}, \%$ (об.)
1	5	найти	4,2	2,5	4,7	4,2	найти
2	10	0,014	найти	3,2	3,2	найти	17
3	20	0,015	3,8	найти	1,5	найти	15
4	0	найти	4,1	5,0	1,9	4,4	найти
5	12	0,018	найти	6,0	5,3	найти	17
6	7	0,016	4,5	найти	4,5	найти	16
7	30	найти	4,4	3,8	3,1	4,5	найти
8	15	0,014	найти	5,0	1,7	найти	15
9	2	0,013	4,2	найти	2,6	найти	16
10	23	найти	4,4	3,8	3,4	3,7	найти
11	18	0,014	найти	5,0	3,9	найти	15
12	26	0,018	4,5	найти	2,8	найти	17
13	6	Найти	4,3	4,8	2,4	2,3	найти
14	28	0,015	найти	4,7	2,0	найти	16
15	13	0,018	4,5	найти	5,6	найти	16
16	27	найти	4,0	3,0	2,1	3,5	найти
17	21	0,016	найти	4,1	2,5	найти	16
18	1	0,013	3,9	найти	3,5	найти	16
19	19	найти	4,3	3,5	2,9	4,5	найти
20	24	0,015	найти	4,3	2,2	найти	17
21	9	0,016	3,5	найти	1,8	найти	15
22	22	найти	4,2	4,5	5,4	3,8	найти
23	3	0,012	найти	3,8	4,6	найти	16
24	16	0,013	4,1	найти	3,3	найти	17
25	25	найти	4,5	3,5	1,6	4,3	найти
26	8	0,015	найти	4,3	2,7	найти	15
27	11	0,013	5,1	найти	4,3	найти	17
28	14	найти	4,8	4,0	3,6	3,3	найти
29	17	0,016	найти	4,1	3,0	найти	16
30	4	0,014	4,0	найти	2,3	найти	15

Таблица 10.2

Исходные данные

Вар.	Вещество, X	d , м	$\nu_M^{пр}$, кг/(м ² ·с)	B , м	$H_{пр}$, м	t_B , °С	$t_{ср}$, °С
1	Ацетон	3	0,023	1,0	1,5	27	59
2	Бутанол-2	1,5	0,055	0,9	2,0	21	65
3	Бутанон	4	0,038	0,7	1,2	1	60
4	Бутилацетат	2,5	0,045	0,8	1,6	19	78
5	Гексанол-2	5	0,040	0,6	1,7	24	66
6	Глицерин	3,5	0,017	0,8	1,2	9	75
7	Диметиловый эфир	2	0,020	1,0	2,1	22	64
8	Диэтиловый эфир	4,5	0,053	1,2	1,8	3	67
9	Метанол	7	0,034	0,8	1,8	16	59
10	Пентанол-2	6,5	0,029	1,1	1,7	25	83
11	Пентанон-3	5,5	0,038	1,0	2,2	8	69
12	Пропанол-1	6	0,055	0,9	1,9	11	85
13	Этанол	7,5	0,025	0,8	1,8	14	62
14	Этилацетат	7	0,030	0,7	1,5	17	77
15	Этиленгликоль	6,5	0,039	0,8	2,2	4	74
16	Этилбензол	5,5	0,028	0,8	1,8	5	67
17	Толуол	6	0,037	0,8	1,5	10	55
18	Стирол	7,5	0,042	1,0	2,2	20	88
19	Пропилбензол	8	0,035	0,9	1,8	0	76
20	Пентан	1	0,027	0,8	2,2	12	55
21	Октен-1	8	0,045	0,8	1,3	7	58
22	Октан	1	0,047	1,0	2,2	30	80
23	Нонан	3	0,035	1,2	1,5	15	68
24	м-Ксилол	1,5	0,013	0,7	1,4	2	72
25	Декан	4	0,020	1,1	1,7	23	63
26	Гептан	2,5	0,017	1,2	1,8	18	81
27	Гептан	5	0,025	0,8	2,0	26	56
28	Гексен-1	3,5	0,022	0,9	2,2	6	66
29	Гексан	2	0,033	1,0	1,9	28	64
30	Бензол	4,5	0,015	0,7	1,5	13	79

11. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОТУХАНИЯ

Для прекращения горения газов необходимо и достаточно отобрать непосредственно от зоны горения такое количество теплоты, чтобы температура факела понизилась до температуры потухания.

За адиабатическую температуру потухания можно принять минимально возможную адиабатическую температуру горения газового фонтана.

Удобнее всего при расчетах эту температуру считать температурой горения на нижнем концентрационном пределе воспламенения (НКПВ) φ_H .

Для вычисления НКПВ смеси газов применима формула Ле-Шателье:

$$\varphi_H^{\text{см}} = \frac{100}{\sum \frac{\varphi_{gi}}{\varphi_{ni}}}, \quad (11.1)$$

где φ_{gi} – концентрация i -го горючего компонента в смеси, % об.;

φ_{ni} – НКПВ i -го горючего компонента, % об.

При наличии в смеси негорючих добавок расчет НКПВ смеси газов ведется по формуле:

$$\varphi_{\text{б.п.}}^{\text{см}} = \frac{\varphi_{\text{п}} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{\text{н.г.}}}{100 - \varphi_{\text{н.г.}}} \right) \cdot 100}{100 + \varphi_{\text{п}} \cdot \frac{\varphi_{\text{н.г.}}}{100 - \varphi_{\text{н.г.}}}}, \quad (11.2)$$

где $\varphi_{\text{н.г.}}$ – концентрация негорючих газов в смеси, % об.;

$\varphi_{\text{п}}$ – НКПВ смеси, рассчитанные по формуле Ле-Шателье, % об.

По $\varphi_H^{\text{см}}$ определяется коэффициент избытка воздуха на НКПВ

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_H^{\text{см}}}{\varphi_H^{\text{см}} \cdot V_{\text{в}}^0}. \quad (11.3)$$

Теоретический объем воздуха $V_{\text{в}}^0$ рассчитывается по формуле

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{Г}i} \nu_{\text{O}_2i} - \varphi_{\text{O}_2}}{21}, \quad (11.4)$$

где $\varphi_{\text{Г}i}$ – концентрация i -го горючего компонента в смеси, % об.;

ν_{O_2i} – количество кислорода, необходимое для окисления 1 кмолья горючего компонента, кмоль;

φ_{O_2} – концентрация кислорода в смеси, % об.

Разность между практическим и теоретическим объемами воздуха называется избытком воздуха $\Delta V_{\text{в}}$:

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1). \quad (11.5)$$

Среднее теплосодержание продуктов горения газовой смеси $H_{\text{ср}}$ составит:

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{см}}}{V_{\text{пр}}^0 + \Delta V_{\text{в}}}, \quad (11.6)$$

где $V_{\text{пр}}^0$ – теоретический объем продуктов горения газовой смеси.

Так как большую часть объема продуктов горения составляет азот, то приближенная температура горения выбирается по табл. прил. 7, ориентируясь на азот.

Методом линейной интерполяции определяется адиабатическая температура горения

$$T_{\text{г}}^0 = T_1 + \frac{(Q_{\text{н}}^{\text{см}} - Q_1) \cdot (T_2 - T_1)}{Q_2 - Q_1}. \quad (11.7)$$

Теплосодержание продуктов горения с температурой T_i

$$Q_{T_i} = \sum H_i \cdot V_{\text{пр}i}, \quad (11.8)$$

где H_i – энтальпия i -го продукта горения (см. табл. 11.1);

$V_{\text{пр}i}$ – объем i -го продукта горения.

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

$$T_{\text{пот}}^0 = T_{\text{г}}^0 \left(1 - \frac{3RT_{\text{г}}^0}{E} \right), \quad (11.9)$$

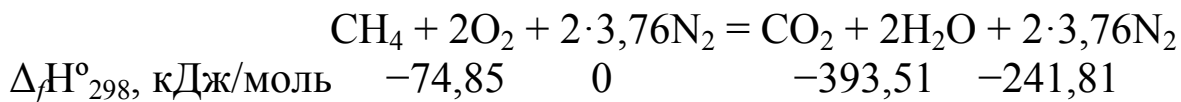
где T_r^0 – адиабатическая температура горения, К;
 R – универсальная газовая постоянная, 8,31 кДж/(моль·К);
 E – эффективная энергия активации реакции горения данного вещества.

Пример 1.

Рассчитать температуру потухания метана в воздухе, если эффективная энергия активации химической реакции горения равна 180 кДж/моль.

Решение.

Для оценки температуры потухания по формуле (11.9) необходимо предварительно рассчитать адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси метана в воздухе



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

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

Теоретический объем продуктов горения

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

Низшая теплота сгорания метана определяется по закону Гесса:

$$\begin{aligned} Q_H &= -\{ \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CO}_2) + 2 \Delta_f H^\circ_{298}(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^\circ_{298}(\text{CH}_4) \} = \\ &= -\{ (-393,51) + 2(-241,81) - (-74,85) \} = 802,29 \text{ кДж/моль} = \\ &= 802,29 / 0,0224 = 35816 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Среднее теплосодержание продуктов горения по формуле (11.6) составит (избыток воздуха равен нулю):

$$H_{\text{ср}} = Q_H / V_{\text{пр}}^0 = 35816 / 10,52 = 3404,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как в продуктах горения наибольшее содержание азота, в качестве первого приближения T_1 по табл. прил. 7 выбирается температура 2000 °С и по формуле (11.8) рассчитывается их теплосодержание Q_1 .

Для $T_1 = 2000$ °С:

$$Q_1 = 4850 \cdot 1 + 3930 \cdot 2 + 2980 \cdot 7,52 = 35119,6 \text{ кДж/моль.}$$

Так как $Q_1 < Q_H$, находится теплосодержание продуктов горения при более высокой температуре – 2100 °С.

Для $T_2 = 2100$ °С:

$$Q_2 = 5120 \cdot 1 + 4170 \cdot 2 + 3140 \cdot 7,52 = 37072,8 \text{ кДж/моль.}$$

Так как $Q_1 < Q_H < Q_2$, определяется адиабатическую температуру горения методом линейной интерполяции (11.6):

$$\begin{aligned} T_r^0 &= T_1 + \frac{(Q_H^{cm} - Q_1) \cdot (T_2 - T_1)}{Q_2 - Q_1} = \\ &= 2000 + \frac{(35816,5 - 35119,6) \cdot (2100 - 2000)}{37072,8 - 35119,6} = 2036 \text{ °С} = \\ &= 2309\text{К} \end{aligned}$$

Температура потухания, рассчитанная по формуле (11.9), равна

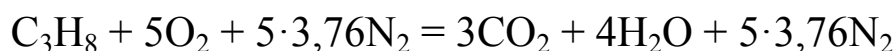
$$\begin{aligned} T_{пот}^0 &= T_r^0 \left(1 - \frac{3RT_r^0}{E} \right) = 2309 \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot 8,31 \cdot 2309}{180 \cdot 10^3} \right) = 1571\text{К} = \\ &= 1298^\circ\text{С} \end{aligned}$$

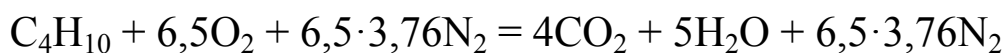
Пример 2.

Рассчитать температуру потухания в воздухе пропан-бутановой смеси, если мольные доли пропана и бутана в смеси составляют 0,3 и 0,7 соответственно, НКПВ 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 объем воздуха, необходимого для горения пропан-бутановой смеси и объем продуктов горения:





Теоретический объем воздуха по формуле (11.4) составит:

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{г}i} \nu_{\text{O}_2i} - \varphi_{\text{O}_2}}{21} = \frac{30 \cdot 5 + 70 \cdot 6,5 - 0}{21} = 28,8 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Расчет теоретического объема продуктов горения приведен в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Расчетный состав продуктов горения

Компонент	Содержание компонента в 1 м ³ смеси, м ³	Объем продуктов горения, м ³ /м ³ смеси		
		CO ₂	H ₂ O	N ₂
C ₃ H ₈	0,3	0,3·3	0,3·4	0,3·5·3,76
C ₄ H ₁₀	0,7	0,7·4	0,7·5	0,7·6,5·3,76
Итого	1	3,7	4,7	22,75

Теоретический объем продуктов горения

$$V_{\text{пр}}^0 = 3,7 + 4,7 + 22,75 = 31,15 \text{ кмоль/кмоль.}$$

Нижний концентрационный предел распространения пламени для смеси газов определяется по формуле Ле-Шателье (11.1):

$$\varphi_{\text{н}} = \frac{100}{\sum \frac{\varphi_{\text{г}i}}{\varphi_{\text{п}i}}} = \frac{100}{\frac{30}{2,3} + \frac{70}{4,3}} = 1,93 \text{ \%об.}$$

Коэффициент избытка воздуха на НКПР рассчитывается по формуле (11.3)

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{н}}^{\text{см}}}{\varphi_{\text{н}}^{\text{см}} \cdot V_{\text{в}}^0} = \frac{100 - 1,93}{1,93 \cdot 28,8} = 1,76.$$

Избыток воздуха $\Delta V_{\text{в}}$, рассчитанный по формуле (11.5) составит:

$$\Delta V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^0 (\alpha - 1) = 28,8(1,76 - 1) = 21,89 \text{ м}^3.$$

Низшая теплота сгорания смеси газов

$$Q_{\text{н}}^{\text{см}} = \sum \varphi_{Gi} Q_{\text{ни}} = 0,32044 + 0,7 \cdot 2657 = 2473,1 \text{ кДж/моль} = \\ = 2473,1 / 0,022,4 = 110406 \text{ кДж/м}^3.$$

Среднее теплосодержание продуктов горения газовой смеси согласно формуле (11.6) составит:

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{см}}}{V_{\text{пт}}^0 + \Delta V_{\text{в}}} = \frac{110406}{31,15 + 21,89} = 2081,6 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Так как большую часть объема продуктов горения составляет азот, то приближенная температура горения выбирается по табл. прил. 7, ориентируясь на азот. Температура смеси должна быть около 1300–1400 °С. Выбирается 1300 °С в качестве первого приближения. По табл. прил. 7 находится:

при $T_1 = 1300 \text{ °С}$

$$Q_1 = 2980 \cdot 3,7 + 2350 \cdot 4,7 + 1860 \cdot 22,75 + 1880 \cdot 21,89 = 105539 \text{ кДж/м}^3;$$

при $T_2 = 1400 \text{ °С}$

$$Q_2 = 3240 \cdot 3,7 + 2560 \cdot 4,7 + 2010 \cdot 22,75 + 2040 \cdot 21,89 = 114403 \text{ кДж/м}^3.$$

Методом линейной интерполяции согласно формуле (11.7) определяется адиабатическая температура потухания:

$$T_{\text{пот}}^0 = 1300 + \frac{(110406 - 105539) \cdot (1400 - 1300)}{114403 - 105539} = 1355 \text{ °С}.$$

Пример 3.

Используя характеристики и параметры компактного газового фонтана: 85 % метана, 9 % этана, 3 % пропана, 2 % азота и 1 % сероводорода, рассчитать адиабатическую температуру потухания. Нижние концентрационные пределы воспламенения для метана 5,28 % об., этана – 2,9 % об., пропана – 2,3 % об., сероводорода – 4,3 % об. Низшая теплота сгорания метана – 802 кДж/моль, этана – 1428 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль, сероводорода – 518 кДж/моль

Решение.

Определяется концентрация горючих компонентов в пересчете на 100 % (содержание горючих компонентов 98 % об.)

$$\varphi_{\text{CH}_4} = \frac{85 \cdot 100}{98} = 86,73 \%;$$

$$\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{9 \cdot 100}{98} = 9,18 \%;$$

$$\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{3 \cdot 100}{98} = 3,06 \%;$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{1 \cdot 100}{98} = 1,02 \%$$

Определяется область воспламенения смеси горючих компонентов по формуле Ле-Шателье (11.1)

$$\varphi_{\text{H}} = \frac{100}{\sum \frac{\varphi_{\text{Гi}}}{\varphi_{\text{Пi}}}} = \frac{100}{\frac{86,73}{5,28} + \frac{9,18}{2,9} + \frac{3,06}{2,3} + \frac{1,02}{4,3}} = \frac{100}{21,16} = 4,73 \% \text{ об.}$$

По формуле (11.2) определяется область воспламенения смеси с учетом содержания негорючих газов – азот 2 % об.

$$\varphi_{\text{б.н}}^{\text{см}} = \frac{\varphi_{\text{п}} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{\text{н.г}}}{100 - \varphi_{\text{н.г}}}\right) \cdot 100}{100 + \varphi_{\text{п}} \cdot \frac{\varphi_{\text{н.г}}}{100 - \varphi_{\text{н.г}}}} = \frac{4,73 \cdot \left(1 + \frac{2}{100 - 2}\right) \cdot 100}{100 + 4,73 \cdot \frac{2}{100 - 2}} = 4,86 \% \text{ об.}$$

Согласно (11.4) теоретический объем воздуха $V_{\text{в}}^0$

$$V_{\text{в}}^0 = \frac{\sum \varphi_{\text{Гi}} \nu_{\text{O}_2\text{i}} - \varphi_{\text{O}_2}}{21} = \frac{85 \cdot 2 + 9 \cdot 3,5 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 1,5 - 0}{21} = 10,38 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

Коэффициент избытка воздуха на НКПВ рассчитывается по формуле (11.3)

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{H}}^{\text{CM}}}{\varphi_{\text{H}}^{\text{CM}} \cdot V_{\text{B}}^0} = \frac{100 - 4,86}{4,86 \cdot 10,38} = 1,89.$$

По формуле (11.5) рассчитывается избыток воздуха ΔV_{B} :

$$\Delta V_{\text{B}} = V_{\text{B}}^0 (\alpha - 1) = 10,38(1,89 - 1) = 9,24 \frac{\text{M}^3}{\text{M}}.$$

Среднее теплосодержание продуктов горения газовой смеси H_{CP} , рассчитанное по формуле (11.6) составит:

$$H_{\text{CP}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{CM}}}{V_{\text{ПГ}}^0 + \Delta V_{\text{B}}} = \frac{35866,89}{11,45 + 9,24} = 1733,5 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3}.$$

Так как большую часть объема продуктов горения составляет азот, то приближенная температура горения выбирается по табл. прил. 7, ориентируясь на азот. Температура смеси должна быть около 1100–1200 °С. По табл. прил. 7 определяется теплосодержание продуктов горения при температуре $T_2 = 1200$ °С:

$$\begin{aligned} Q_2 &= 1710 \cdot 8,22 + 2720 \cdot 1,12 + 2130 \cdot 2,1 + 2740 \cdot 0,01 + 1720 \cdot 9,24 = \\ &= 37495,8 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3}. \end{aligned}$$

При температуре $T_1 = 1100$ °С:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 1550 \cdot 8,22 + 2460 \cdot 1,12 + 1930 \cdot 2,1 + 2490 \cdot 0,01 + 1410 \cdot 9,24 = \\ &= 32602,5 \frac{\text{кДж}}{\text{M}^3}. \end{aligned}$$

Методом линейной интерполяции определяется адиабатическая температура потухания

$$\begin{aligned} T_{\text{пот}}^0 &= T_1 + \frac{(Q_{\text{H}}^{\text{CM}} - Q_1) \cdot (T_2 - T_1)}{Q_2 - Q_1} = \\ &= 1100 + \frac{(35866,89 - 32602,5) \cdot (1200 - 1100)}{37495,8 - 32602,5} = \\ &= 1100 + \frac{326439}{4893,3} = 1167^{\circ} \text{C}. \end{aligned}$$

Задания для самостоятельной работы

1. Рассчитать температуру потухания этана в воздухе, если эффективная энергия активации химической реакции горения равна 150 кДж/моль.

2. Рассчитать температуру потухания пропана в воздухе, если эффективная энергия активации химической реакции горения равна 175 кДж/моль.

3. Рассчитать температуру потухания в воздухе смеси этана и пропана, если мольные доли этана и пропана в смеси составляют 0,6 и 0,4 соответственно. НКПВ этана – 2,9 % об., пропана – 2,3 % об. Низшая теплота сгорания этана – 1427 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль.

4. Рассчитать адиабатическую температуру потухания в воздухе газовой смеси. Состав смеси в табл. 11.2. Нижние концентрационные пределы воспламенения для метана – 5,28 % об., этана – 2,9 % об., пропана – 2,3 % об. Низшая теплота сгорания метана – 802 кДж/моль, этана – 1427 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль.

Таблица 11.2

Исходные данные

Вар.	Содержание компонентов, % об.		
	Метан	Этан	Пропан
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
1	92	6	2
2	87	3	10
3	85	11	4
4	92	5	3
5	82	12	6
6	89	5	6
7	90	7	3
8	89	8	3
9	93	5	2
10	81	6	13
11	91	7	2
12	93	2	5

Окончание табл. 11.2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
13	84	6	10
14	88	10	2
15	95	2	3
16	85	10	5
17	93	2	5
18	86	12	2
19	94	4	2
20	92	4	4
21	87	7	6
22	89	9	2
23	86	5	9
24	83	9	8
25	91	4	5
26	90	8	2
27	80	10	10
28	86	12	2
29	90	4	6
30	86	6	8

12. РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОДАЧИ И РАСХОДА ОГNETУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ

Для определения показателей работы при тушении пожара, правильности выбора решающего направления, выбора огнетушащего средства, приемов и способов его подачи используют основные параметры процесса тушения пожара. Такими показателями являются время тушения, огнетушащая эффективность и интенсивность подачи огнетушащего вещества, удельный расход и общий расход огнетушащего вещества. Все параметры пожаротушения взаимосвязаны между собой.

Время тушения, мин – время от начала подачи огнетушащего вещества до прекращения горения.

Общее количество огнетушащего вещества m – количество огнетушащего вещества, которое подается за время тушения пожара на общую площадь пожара или объем помещения.

Интенсивность подачи I – количество огнетушащего вещества, которое подается в единицу времени на единицу расчетного параметра пожара (периметра, фронта, площади пожара или объема помещения, в котором происходит пожар). Исходя из этого, различают линейную интенсивность подачи л/(м с), поверхностную л/(м² с) и объемную л/(м³ с):

$$I = \frac{m}{P \cdot \tau_T},$$

где m – общее количество огнетушащего вещества, л, кг, м³;

P – величина параметра пожара, (площадь, периметр, объем) м, м², м³;

τ_T – время тушения пожара, с.

Чаще всего интенсивность подачи рассчитывают на единицу площади пожара:

$$I = \frac{g_{\text{об}}}{S_{\text{п}}}, \quad (12.1)$$

где $g_{\text{об}}$ – секундный расход огнетушащего вещества, л/с, кг/с;

$S_{\text{п}}$ – площадь пожара, м².

Удельный расход $g_{\text{уд}}$ – количество огнетушащего средства, которое расходуется в единицу времени на тушение расчетного параметра пожара (л/м², кг/м², л/м³, кг/м³):

– при тушении по поверхности

$$g_{уд} = I \tau_T = \frac{g_{об}}{S_{п}} \cdot \tau_T, \quad (12.2)$$

– при объемном тушении

$$g_{уд} = I \cdot \tau_T = \frac{g_{об}}{V_{пом}} \cdot \tau_T, \quad (12.3)$$

где $V_{пом}$ – объем помещения, m^3 .

Теоретический удельный расход $g_{уд}^{теор}$, л/ m^3 , л/ m^2 , кг/ m^2 , кг/ m^3 :

$$g_{уд}^{теор} = \frac{Q_{треб}}{Q_{охл}}, \quad (12.4)$$

где $Q_{треб}$ – количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения или поверхности материала для снижения температуры пламени до температуры потухания, кДж/ m^3 , кДж/ m^2 ;

$Q_{охл}$ – охлаждающий эффект огнетушащего вещества, кДж/л, кДж/кг, кДж/ m^3 .

Теоретическая интенсивность подачи $I_{теор}$ при тушении пламени над поверхностью, л/($m^2 \cdot c$), кг/($m^2 \cdot c$):

$$I_{теор} = \frac{q_{отв}^{треб}}{Q_{охл}}, \quad (12.5)$$

где $q_{отв}^{треб}$ – удельная интенсивность теплоотвода от пламени, требуемая для его охлаждения до температуры потухания, кВт/ m^2 ;

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

Требуемую интенсивность теплоотвода можно приближенно оценить по формуле

$$q_{отв}^{треб} = (1 - f) \cdot k \cdot q_{п}', \quad (12.6)$$

где f – коэффициент теплопотерь излучением;

k – коэффициент снижения температуры пламени до температуры потухания;

$q_{п}'$ – приведенная теплота пожара, кВт/ m^2 .

Приведенная теплота пожара находится по формуле:

$$q_{\Pi}' = \beta v_{\text{м}}^{\text{пр}} Q_{\text{н}}, \quad (12.7)$$

где β – коэффициент полноты сгорания;

$v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

$Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания горючего вещества, $\text{кДж}/\text{кг}$.

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

Графическая зависимость времени тушения и удельного расхода огнетушащего вещества от интенсивности подачи называется *кривой тушения* (рис. 12.1).

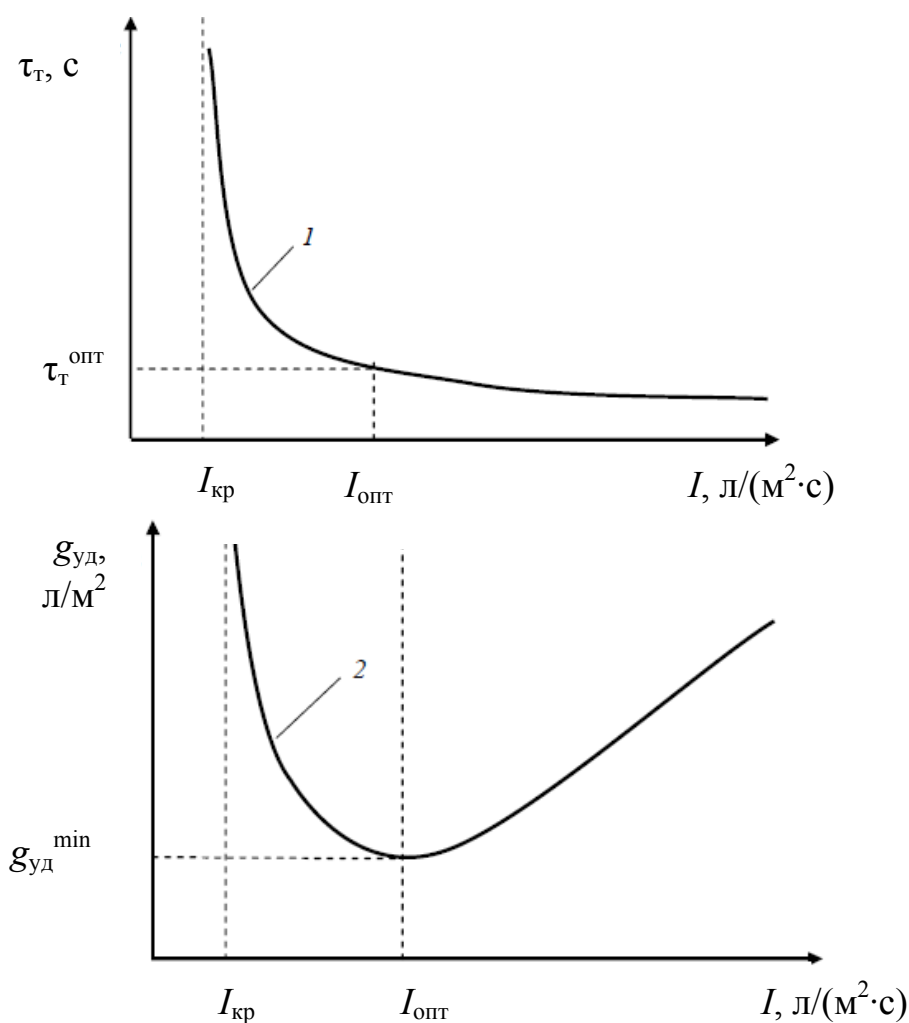


Рис. 12.1. Зависимость времени тушения 1 и удельного расхода 2 от интенсивности подачи огнетушащего вещества

Время тушения зависит от соотношения фактической и критической интенсивностей подачи вещества. Если фактическая интенсивность подачи огнетушащего вещества равна критической, то тушение не достигается.

Существует *критическая интенсивность подачи* $I_{кр}$, при и ниже которой тушение не будет достигнуто никогда (время тушения стремится к бесконечности).

Для разных видов огнетушащих средств характер изменения удельного расхода от интенсивности подачи сохраняет подобную зависимость. Это позволяет говорить о существовании оптимального времени тушения и оптимальной интенсивности подачи $I_{опт}$ огнетушащего вещества для тушения пожара, при которых расход огнетушащего вещества будет минимальным.

Обобщенные значения интенсивности подачи огнетушащих веществ, полученные путем анализа потушенных пожаров сведены в таблицы нормативных документов и справочников. Такую интенсивность принято называть *нормативной интенсивностью подачи* огнетушащего вещества.

Эффективность применяемого огнетушащего вещества и способа подачи можно оценить с помощью показателя эффективности тушения $P_{эт}$ и коэффициента использования $K_{исп}$.

Показатель эффективности тушения $P_{эт}$ определяется следующим образом:

$$P_{эт} = \frac{1}{I \cdot \tau_t^2} = \frac{1}{g_{уд} \cdot \tau_t}. \quad (12.8)$$

Коэффициент использования $K_{исп}$ – отношение теоретического удельного расхода огнетушащего вещества к фактическому:

$$K_{исп} = \frac{g_{уд}^{теор}}{g_{уд}^{факт}}. \quad (12.9)$$

Коэффициент потерь $K_{пот}$ – отношение фактического расхода огнетушащего средства к нормативному:

$$K_{пот} = \frac{g_{уд}^{факт}}{g_{уд}^{норм}}. \quad (12.10)$$

При хорошей организации тушения пожара фактический расход огнетушащего вещества должен равняться нормативному.

Расчет расхода воды, требуемого для прекращения горения 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.

Теоретический удельный расход огнетушащего вещества определяется по формуле (12.4).

Удельное количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения для снижения температуры пламени до температуры потухания $Q_{\text{треб}}$, кДж/м³, находится по следующим формулам:

$$Q_{\text{треб}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{пг}i} \cdot (H_{\text{пг}i} - H_{\text{пот}i}) \quad (12.11)$$

или

$$Q_{\text{треб}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{пг}}^{\text{Тпот}}, \quad (12.12)$$

где $V_{\text{пг}i}$ – удельный объем i -го продукта горения, м³/м³;

$H_{\text{пг}i}$ и $H_{\text{пот}i}$ – энтальпия i -го продукта горения при температурах горения и потухания соответственно, кДж/м³ (см. табл. прил. 7);

$Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания, кДж/м³;

$Q_{\text{пг}}^{\text{Тпот}}$ – суммарное удельное теплосодержание продуктов горения стехиометрической смеси при температуре потухания, кДж/м³.

За температуру потухания принимается адиабатическая температура горения предельно обедненной газовой смеси – смеси на НКПР.

Охлаждающий эффект воды при объемном тушении находится по формуле:

$$Q_{\text{охл}} = c_p^{\text{ж}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_p^{\text{пара}} \cdot (T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}), \quad (12.13)$$

где $c_p^{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость воды, $c_p^{\text{ж}} = 4,18$ кДж/(кг·К) в интервале 273–373 К;

r – теплота парообразования, $r = 2256$ кДж/кг;

$c_p^{\text{пара}}$ – средняя удельная теплоемкость водяного пара, $c_p^{\text{пара}} = 2,20$ кДж/(кг·К);

$T_{\text{кип}}$, T_0 , $T_{\text{пот}}$ – температура кипения воды, исходная температура и температура потухания, К.

Расчет интенсивности подачи огнетушащих средств при тушении жидкости

Необходимым условием для тушения жидкости также является прекращение горения в газовой фазе.

Условием *необходимым и достаточным* для тушения жидкости охлаждением поверхности является понижение ее температуры от температуры кипения до температуры вспышки. 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:

$$q_{\text{отв}}^{\text{треб}} = [c_p^{\text{ж}}(T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}) + r]v_{\text{м}}^{\text{уд}} + \frac{Q_{\text{зап}}}{\tau_{\text{т}}}, \quad (12.14)$$

где $c_p^{\text{ж}}$ – изобарная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

$T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{всп}}$ – температура кипения и вспышки соответственно, К;

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 $Q_{\text{зап}}$, кДж/м², аккумулируемое прогретым слоем жидкости, находится по формуле:

$$Q_{\text{зап}} = \frac{\lambda \rho}{v_{\text{м}}^{\text{уд}}} (T_{\text{кип}} - T_{\text{всп}}), \quad (12.15)$$

где λ – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К);

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$v_M^{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

Если огнетушащее вещество подается с интенсивностью I , поступает на поверхность прогретого слоя без потерь и полностью реализует свою охлаждающую способность $Q_{охл}$, то интенсивность теплоотвода будет равна:

$$q_{отв}^{треб} = I \cdot Q_{охл}.$$

Из уравнения (12.14) получаем теоретическое время тушения жидкости охлаждением прогретого слоя

$$\tau_T = \frac{Q_{зап}}{I \cdot Q_{охл} - [c_p^ж(T_{кип} - T_{всп}) + r] \cdot v_M^{уд}}, \quad (12.16)$$

где $Q_{охл}$ – 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 м² поверхности горения или 1 м³ объема зоны горения.

Значение интенсивности подачи, при которой знаменатель формулы (12.16) обращается в 0, является критической. В этом случае $\tau_T \rightarrow \infty$ и тушение становится невозможным.

Из формулы (12.16) следует, что критическая интенсивность подачи огнетушащего вещества $I_{кр}$, л/(м²·с) или кг/(м²·с), при таком способе тушения жидкости равна

$$I_{кр} = \frac{[c_p^ж(T_{кип} - T_{всп}) + r] \cdot v_M^{уд}}{Q_{охл}}. \quad (12.17)$$

Выбор конкретного огнетушащего вещества зависит от его способности выполнить все условия, необходимые и достаточные для прекращения горения.

Расчет интенсивности подачи огнетушащих средств при тушении твердых горючих материалов

Гомогенное горение твердых горючих материалов (ТГМ) обусловлено образованием горючих газов в результате пиролиза.

Пиролиз некоторых ТГМ начинается после плавления и протекает в тонком поверхностном слое. Как правило, это линейные несшитые полимеры (полиметилметакрилат, полиэтилен, полистирол и другие термопласты). Удельное количество тепла, аккумулируемое в прогретом слое плавящихся материалов $Q_{\text{зап}}$, определяется по формуле (12.15).

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).

Удельный запас тепла $Q_{\text{зап}}$, кДж/м², накопленный в углистом слое твердого материала за время свободного горения, равен:

$$Q_{\text{зап}} = q_{\text{зап}} \cdot \tau_{\text{гор}}, \quad (12.18)$$

где $q_{\text{зап}}$ – тепловой поток, аккумулируемый пиролизующимся слоем, кВт/м²;

$\tau_{\text{гор}}$ – время свободного горения, с.

Значение $q_{\text{зап}}$, кВт/м², определяется из уравнения теплового баланса горения:

$$q_{\text{вн}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot (L - L_{\text{экз}}) + q_{\text{зап}} + q_{\text{конв}}, \quad (12.19)$$

где $q_{\text{вн}}$ – внешний лучистый тепловой поток, падающий на поверхность, кВт/м²;

$v_{\text{м}}^{\text{пр}}$ – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м² · 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/м².

С учетом формул (12.18) и (12.19) получается:

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot (L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \cdot \tau_{\text{гор}}. \quad (12.20)$$

Величина $q_{\text{конв}}$, кВт/м², определяется теплосодержанием газообразных продуктов пиролиза:

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}), \quad (12.21)$$

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, $T_{\text{пов}} \approx 973$ К;

$T_{\text{пир}}$ – температура пиролиза, $T_{\text{пир}} \approx 473$ К.

Теплота пиролиза L зависит от вида горючего материала.

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 ($L_{\text{экз}} = 0,06 \cdot Q_{\text{н}}$).

При их тушении ТГМ необходимо снижение температуры прогретого слоя до температуры начала пиролиза или плавления. 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:

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{треб}} = Q_{\text{пов}} + Q_{\text{зап}}, \quad (12.22)$$

где $Q_{\text{отв}}$ – тепло, отводимое огнетушащим веществом от 1 м² поверхности, кДж/м²;

$Q_{\text{пов}}$ – тепло, поступающее к поверхности, кДж/м²;

$Q_{\text{зап}}$ – удельное теплосодержание прогретого слоя, кДж/м².

Здесь

$$Q_{\text{пов}} = q_{\text{луч}} \cdot \tau_{\text{т}},$$

где $q_{\text{луч}}$ – плотность суммарного теплового потока, падающего от собственного пламени и внешних источников излучения, кВт/м²;

$\tau_{\text{т}}$ – время тушения, с.

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

$$Q_{\text{отв}} = I \cdot Q_{\text{охл}} \cdot \tau_T, \quad (12.23)$$

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

Отсюда теоретическое, минимально возможное, время тушения по механизму отвода тепла от поверхности τ_T , с, равно

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}}. \quad (12.24)$$

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

При $I \rightarrow \infty$ время тушения $\tau_T \rightarrow 0$. 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 20 с.

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

$$\tau_T = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0. \quad (12.25)$$

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

Умножив обе части формулы (12.25) на I , получим выражение для удельного расхода огнетушащего вещества:

$$g_{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} \cdot I + I \cdot \tau_0. \quad (12.26)$$

Оптимальная интенсивность подачи, при которой обеспечивается минимальный удельный расход огнетушащего вещества (см. рис. 12.1), находится дифференцированием уравнения (12.26)

по I , л/(м²·с). Приравняв первую производную $dg_{уд}/dI$ к нулю, получим выражение для оптимальной интенсивности подачи:

$$I_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} \cdot q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right). \quad (12.27)$$

Определение интенсивности подачи пены

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 I всегда задается в л/(м²·с) по пенообразующему раствору и определяется по формуле

$$I = \frac{g \cdot n}{S_p}, \quad (12.28)$$

где g – производительность пеногенератора по раствору, л/с;

n – число пеногенераторов;

S_p – площадь поверхности горения, м².

Интенсивность подачи, при которой количество подаваемой пены равно количеству разрушаемой, называется *критической* $I_{\text{кр}}$.

Очевидно, что объем слоя пены, накопленного за время тушения, равен разности объемов пены, поданной и разрушенной. Соответственно интенсивность накопления пены $I_{\text{нак}}$ равна

$$I_{\text{нак}} = I - I_{\text{кр}}.$$

Отсюда критическая интенсивность подачи раствора равна

$$I_{\text{кр}} = I - I_{\text{нак}}. \quad (12.29)$$

Если известен объем пены $V_{\text{нак}}$, накопленный за время тушения, величину $I_{\text{нак}}$ в л/(м²·с) можно вычислить по формуле:

$$I_{\text{нак}} = \frac{V_{\text{нак}} \cdot 10^3}{\tau \cdot S_p \cdot K_{\text{пены}}} = \frac{H \cdot S_p \cdot 10^3}{\tau \cdot S_p \cdot K_{\text{пены}}} = \frac{H \cdot 10^3}{\tau \cdot K_{\text{пены}}}, \quad (12.30)$$

где H – толщина накопленного слоя пены, м;

S_p – площадь зеркала жидкости (резервуара), м²;

τ – время подачи пены, с;

$K_{\text{пены}}$ – кратность пены; коэффициент 10^3 необходим для перевода кубических метров в литры.

Оптимальной является интенсивность подачи $I_{\text{опт}}$, при которой удельный расход $g_{\text{уд}}$ раствора пенообразователя минимален.

Зависимость времени тушения пеной от интенсивности подачи раствора может быть описана уравнением общего вида:

$$\tau_{\tau} = B \frac{I + I_{\text{кр}}}{I - I_{\text{кр}}}, \quad (12.31)$$

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

Так как $g_{\text{уд}} = I \cdot \tau_{\tau}$, можно записать:

$$g_{\text{уд}} = I \cdot B \frac{I + I_{\text{кр}}}{I - I_{\text{кр}}}. \quad (12.32)$$

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

Значение оптимальной интенсивности подачи пены также можно определять по эмпирической формуле

$$I_{\text{опт}} = 2,3 \cdot I_{\text{кр}}. \quad (12.33)$$

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

$$H_{\text{пены}} = 10^{-3} \cdot (I - I_{\text{кр}}) \cdot K_{\text{пены}} \cdot \tau_{\tau}, \quad (12.34)$$

где 10^{-3} – коэффициент перевода литров в кубические метры.

Определение расхода газовых огнетушащих составов

Газовые огнетушащие составы являются веществами преимущественно объемного действия. Они прекращают горение в газовой фазе. К этому классу огнетушащих веществ относятся инертные разбавители (нейтральные газы) 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 $\phi_{огн}$. Материальный баланс процесса заполнения негерметичного помещения, в упрощенном виде, описывается следующим уравнением:

$$v_{гос} d\tau = V_{пом} da + v_{пр} a d\tau,$$

где $v_{гос}$ – объемный расход газового огнетушащего состава, м³/с;
 $v_{пр}$ – расход продуктов горения через проемы, щели, м³/с;
 $V_{пом}$ – объем помещения, м³;
 a – текущее значение объемной доли газового состава;
 τ – время, с.

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

$$\tau_T = \frac{2V_{пом} \cdot a_{огн}}{2v_{гос} - v_{пр} \cdot a_{огн}}. \quad (12.35)$$

Расход продуктов горения определяется по формуле:

$$v_{пр} = \frac{2}{3} \mu \cdot \frac{(S_{пр} - S_1)}{\rho_{пр}} \sqrt{2g(H_{пр} - h_0) \rho_{пр} (\rho_v - \rho_{пр})}, \quad (12.36)$$

где μ – коэффициент сопротивления проема ($\mu \approx 0,65$);
 $S_{пр}$ – площадь проема, м²;
 $H_{пр}$ – высота проема, м;
 h_0 – высота плоскости равных давлений, м;

S_1 – площадь приточной части проема, м^2 ($S_1 = B_{\text{пр}}h_0$, где $B_{\text{пр}}$ – ширина проема, м);

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\rho_{\text{пр}}$ – плотность продуктов горения, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Из формулы (12.35) следует, что критический расход газового состава, при котором $\tau_{\text{т}} \rightarrow \infty$, равен:

$$v_{\text{гос}}^{\text{кр}} = \frac{1}{2} v_{\text{пр}} \cdot a_{\text{огн}}. \quad (12.37)$$

Массовый секундный расход газа g , $\text{кг}/\text{с}$:

$$g = v_{\text{гос}} \cdot \rho_{\text{гос}}. \quad (12.38)$$

Удельный расход газа $g_{\text{уд}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, равен:

$$g_{\text{уд}} = \frac{g \cdot \tau_{\text{т}}}{V}. \quad (12.39)$$

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.

Расчет минимальной флегматизирующей концентрации и минимального взрывоопасного содержания кислорода

Добавление в горючую смесь инертных разбавителей (азот, диоксид углерода, аргона, гелия, паров воды) приводит к значительному снижению области ее воспламенения. Такое влияние нейтральных, а также инертных газов называют флегматизирующим, а вещества, обладающие этим качеством, – *флегматизаторами*. Существует минимальная концентрация флегматизаторов в горючей смеси, при которой и выше которой смесь теряет способность к воспламенению при любом соотношении горючего и окислителя.

Изменение концентрационных пределов распространения пламени (КПРП) при этом зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора. Влияние флегматизаторов на КПРП зависит от тепловых

характеристик газов – теплоемкости и теплопроводности. Чем выше теплоемкость газа при одной и той же теплопроводности, тем выше эффективность его действия. При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхний КППП ($\varphi_{\text{в}}$) уменьшается, а нижний КППП ($\varphi_{\text{н}}$), как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определенной для каждого флегматизатора концентрации нижний и верхний концентрационные пределы сливаются (рис. 12.2). Эта точка называется экстремальной точкой области распространения пламени, или *точкой флегматизации*.

Концентрация флегматизатора, при которой происходит слияние нижнего и верхнего пределов, называется *минимальной флегматизирующей концентрацией* (МФК). МФК – наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя. По сути МФК – минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы она стала негорючей.

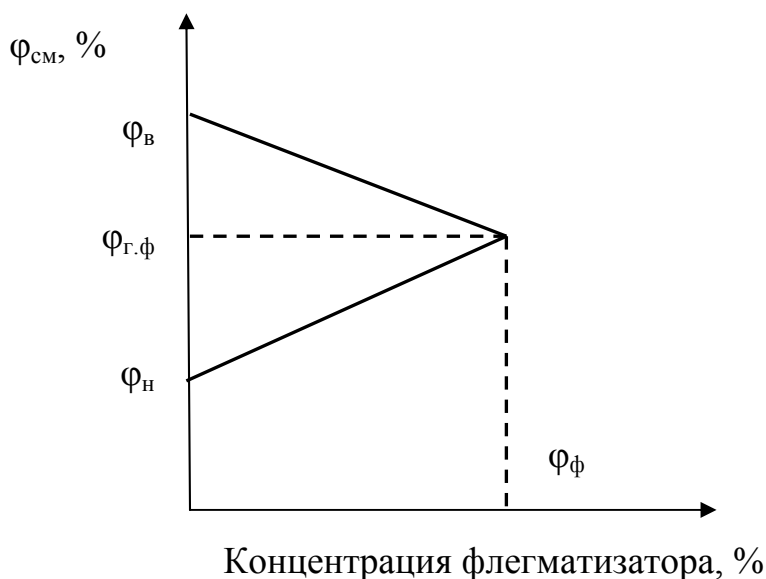


Рис. 12.2. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газоздушной смеси

Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать исходя из того, что адиабатная температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

Уравнение для расчета адиабатной температуры горения T_r стехиометрической смеси, содержащей флегматизатор, имеет вид

$$T_r = T_0 + \frac{Q_n}{\sum_i (C_{P_{\text{пг}i}} \cdot V_{\text{пг}i}) + C_{P_\phi} \cdot V_\phi}, \quad (12.40)$$

где T_0 – стандартная температура, равная 273 К;

Q_n – низшая теплота сгорания горючего;

$C_{P_{\text{пг}i}}$ – изобарная теплоемкость i -го продукта горения, кДж/(моль·К);

C_{P_ϕ} – изобарная теплоемкость флегматизатора, кДж/(моль·К);

$V_{\text{пг}i}$ – объем i -го продукта горения, м³/м³;

V_ϕ – объем флегматизатора, м³/м³.

Значения изобарных теплоемкостей веществ приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Средние значения изобарной теплоемкости основных продуктов горения в интервале температур 273–1500 К

Вещество	Удельная теплоемкость, C_p , кДж/(моль·К)
Диоксид углерода	$5,08 \cdot 10^{-2}$
Диоксид серы	$5,11 \cdot 10^{-2}$
Вода (пар)	$3,99 \cdot 10^{-2}$
Азот	$3,18 \cdot 10^{-2}$
Воздух	$3,23 \cdot 10^{-2}$

Тогда объем флегматизатора равен

$$V_\phi = \frac{Q_n - (T_r - T_0) \cdot \sum_i (C_{P_{\text{пг}i}} \cdot V_{\text{пг}i})}{(T_r - T_0) \cdot C_{P_\phi}}, \quad (12.41)$$

а его минимальная флегматизирующая концентрация в стехиометрической смеси составит

$$\varphi_\phi = \frac{V_\phi \cdot 100}{V_r + V_\phi + V_{N_2} + V_{O_2}}, \quad (12.42)$$

где V_r – объем горючего в смеси, м³/м³;

V_{O_2} , V_{N_2} – объем кислорода и азота соответственно, м³/м³.

Концентрация горючего в смеси, соответствующая точке флегматизации ($\varphi_{гф}$) рассчитывается по уравнению:

$$\varphi_{гф} = \frac{V_r \cdot 100}{V_r + V_{ф} + V_{N_2} + V_{O_2}}. \quad (12.43)$$

Концентрация кислорода в этой же смеси (в точке флегматизации) называется *минимальным взрывоопасным содержанием кислорода* (МВСК) – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в горючей смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором.

МВСК рассчитывается по формуле

$$\varphi_{O_2ф} = \frac{100 - \varphi_{ф}}{4,844}. \quad (12.44)$$

Безопасная концентрация кислорода принимается с некоторым запасом и рассчитывается по формуле

$$\varphi_{O_2без} = 1,2\varphi_{O_2ф} - 4,2. \quad (12.45)$$

Пример 1.

Найти фактическую интенсивность подачи и удельный расход воды, если на тушение пожара площадью 50 м^2 было подано 3 ручных ствола с расходом $g_{ств} = 3,5 \text{ л/с}$, время тушения 6 мин.

Решение.

Суммарный секундный расход воды составляет:

$$g = \sum g_{ств} = 3 \cdot 3,5 = 10,5 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Согласно формуле (12.1) фактическая интенсивность подачи равна

$$I = \frac{g_{об}}{S_{п}} = \frac{10,5}{50} = 0,21 \frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

По формуле (12.2) удельный расход воды за все время тушения составил

$$g_{\text{уд}} = I\tau_{\text{т}} = 0,21 \cdot 6 \cdot 60 = 75,6 \frac{\text{л}}{\text{м}^2}.$$

Пример 2.

Рассчитать требуемый секундный расход воды и количество ручных стволов на тушение пожара площадью 150 м^2 , если требуемая для тушения интенсивность подачи составляет $0,1 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Расход ствола $g_{\text{ств}} = 7 \text{ л}/\text{с}$.

Решение.

Требуемый секундный расход определяется из формулы (12.1)

$$g_{\text{об}} = IS_{\text{п}} = 0,1 \cdot 150 = 15 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Требуемое количество стволов $N_{\text{ств}}$ составит

$$N_{\text{ств}} = \frac{g}{g_{\text{ств}}} = \frac{15}{7} = 2,14.$$

Таким образом, количество стволов составляет 3.

Пример 3.

Найти коэффициент использования огнетушащего порошка при тушении пламени над поверхностью ТГМ на площади 10 м^2 , если пожар был потушен за 8 с тремя ручными огнетушителями с расходом $0,45 \text{ кг}/\text{с}$ порошка каждый. Количество тепла, которое требуется отвести от зоны горения, составляет $1000 \text{ кВт}/\text{м}^2$. Охлаждающий эффект порошка $1500 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Решение.

Теоретический удельный расход можно определить по формуле (12.4):

$$g_{\text{уд}}^{\text{теор}} = \frac{Q^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{1000}{1500} = 0,67 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Согласно формуле (12.2) фактический удельный расход составит:

$$g_{уд}^{\phi} = \frac{g_{огн} \cdot N_{огн} \cdot \tau_{т}}{S_{п}} = \frac{0,45 \cdot 3 \cdot 8}{10} = 1,08 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Коэффициент использования определяется по формуле (12.9) и составляет

$$K_{исп} = \frac{g_{уд}^{\text{теор}}}{g_{уд}^{\text{факт}}} = \frac{0,67}{1,08} = 0,62.$$

Пример 4.

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

	№ 1	№ 2
Площадь пожара, м ²	20	20
Огнетушащие вещества	Порошок+	Вода
Средства тушения	водопенный раствор Переносные огнетушители	Ручные стволы
Время тушения, с	292	300
Затраты огнетушащих веществ	16 кг порошка+ 35 л раствора (плотность 1000 кг/м ³)	2200 л

Решение.

Для сравнительной оценки эффективности разных способов и средств тушения используется показатель эффективности тушения $\Pi_{эт}$ (12.8).

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 – $q_{уд} = 2200/20 = 110 \text{ кг/м}^2$.

$$\Pi_{эт}^1 = \frac{1}{g_{уд} \cdot \tau_{т}} = \frac{1}{2,55 \cdot 292} = 1,34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}};$$

$$\Pi_{эт}^2 = \frac{1}{g_{уд} \cdot \tau_{т}} = \frac{1}{110 \cdot 300} = 3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{с}}.$$

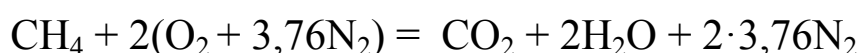
Способ тушения № 1 более эффективен, чем способ № 2.

Пример 5.

Рассчитать теоретический удельный расход воды, л/м³, при тушении газового фонтана (метан) дебитом 3 млн м³/сут, если адиабатическая температура горения газа – 2010 °С, адиабатическая температура потухания – 990 °С. Температура воды 20 °С.

Решение.

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



Используя данные табл. прил. 7, определяется теплосодержание продуктов горения при температурах, близких к температуре горения $T_{\text{Г}}$ (2000 °С) и температуре потухания $T_{\text{пот}}$ (1000 °С), и данные заносятся в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Теплосодержание зоны горения

Продукты горения		Теплосодержание зоны горения, кДж/м ³	
Состав	Объем, м ³ /м ³	при 2000 °С (~ $T_{\text{Г}}$)	при 1000 °С (~ $T_{\text{пот}}$)
CO ₂	1	4850	2210
H ₂ O	2	3930	1720
N ₂	2·3,76	2980	1400

По формуле (12.11), исходя из данных табл. 12.2, находится требуемый теплоотвод:

$$\begin{aligned} Q^{\text{треб}} &= \sum_{i=1}^n V_{\text{пр}i} \cdot (H_{\text{пр}i} - H_{\text{пот}i}) = \\ &= 1 \cdot (4850 - 2210) + 2 \cdot (3930 - 1720) + 2 \cdot 3,76 \cdot (2980 - 1400) = \\ &= 18942 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

По формуле (12.13) определяется охлаждающий эффект воды при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = c_p^{\text{ж}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_p^{\text{пара}} \cdot (T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}) = \\ = 4,18 \cdot (373 - 293) + 2256 + 2,2 \cdot (1263 - 373) = 4548,4 \text{ кДж/л.}$$

Теоретический удельный расход воды по формуле (12.4) составит:

$$g_{\text{уд}}^{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{18942}{4548,4} = 4,16 \frac{\text{л}}{\text{м}^3} .$$

Пример 6.

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/(м²·с), температура кипения – 190 °С, температура вспышки – 53 °С. Для воды охлаждающий эффект 2600 кДж/л.

Решение.

Критическая интенсивность подачи определяется по формуле (12.17)

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

Пример 7.

Определить теоретически необходимую интенсивность подачи I^0 тонкораспыленной воды для тушения пламени ацетона. Приведенная массовая скорость выгорания составляет $v_{\text{м}}^{\text{уд}} = 0,047 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}} = 31403,1 \text{ кДж}/\text{кг}$; коэффициент полноты сгорания ацетона $\beta = 0,85$; температура потухания ацетона $T_{\text{пот}} = 950 \text{ }^\circ\text{С}$. Удельная теплоемкость воды $c = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Теплота парообразования воды $r = 2256 \text{ кДж}/\text{кг}$. Средняя удельная

теплоемкость водяного пара $c_p^{\text{пара}} = 2,20$ кДж/(кг·К). Коэффициент излучения $f = 0,3$, коэффициент $k = 0,28$ (для жидкостей).

Решение.

1. По формуле (12.7) определяются интенсивность тепловыделения с 1 м² площади горения, кВт/м²

$$q'_n = \beta \cdot v_m^{\text{пр}} \cdot Q_n = 0,85 \cdot 0,047 \cdot 31403,1 = 1254,55 \text{ кВт/м}^2.$$

2. По формуле (12.13) определяются охлаждающий эффект воды при объемном тушении:

$$Q_{\text{охл}} = c(T_{\text{кип}} - T_0) + r + c_p^{\text{пара}}(T_{\text{пот}} - T_{\text{кип}}) = 4,18(100 - 20) + 2256 + 2,2 \cdot (950 - 100) = 4460 \text{ кДж/л}.$$

3. Теоретическая интенсивность подачи определяется по формуле (12.5). С учетом формулы (12.6) для расчета требуемой интенсивности теплоотвода, получается

$$I^0 = \frac{q_{\text{отв}}^{\text{треб}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{(1-f) \cdot k \cdot q'_n}{Q_{\text{охл}}} = \frac{(1-0,3) \cdot 0,28 \cdot 1254,55}{4460} = 0,055 \frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Пример 8.

Рассчитать теоретическую оптимальную интенсивность подачи и удельный расход воды для тушения поверхности горячей древесины, если приведенная массовая скорость выгорания $v_m^{\text{пр}} = 0,009$ кг/(м²·с), внешний падающий тепловой поток $q_{\text{вн}} = 45$ кВт/м², время свободного горения 12 мин, минимальное время охлаждения прогретого слоя $\tau_0 = 20$ с. Удельную теплоту пиролиза L принять равной 2800 кДж/кг, низшую теплоту сгорания – 14200 кДж/кг. Теоретический охлаждающий эффект воды – 2600 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$ $c_p \approx 3,7$ кДж/(кг·К). Температура поверхности при горении $t_{\text{пов}} \approx 700$ °С; температура пиролиза $t_{\text{пир}} \approx 200$ °С.

Решение.

Для прекращения горения древесины требуется понизить температуру ее поверхности с $T_{\text{пов}}$ до температуры начала активного пиролиза $T_{\text{пир}}$.

Величина $q_{\text{конв}}$, кВт/м², определяется по формуле (12.21):

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) = 0,009 \cdot 3,7(700 - 200) = 16,65 \text{ кВт/м}^2.$$

Экзотермический эффект вторичных реакций пиролиза $L_{\text{экз}} = 0,06Q_{\text{н}}$.

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

Величина $Q_{\text{зап}}$ определяется по формуле (12.20):

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}}(L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \cdot \tau_{\text{гор}} = \\ = [45 - 0,009(2800 - 852) - 16,65] \cdot 12 \cdot 60 = 7789 \text{ кДж/м}^2.$$

Оптимальная интенсивность подачи $I_{\text{опт}}$, л/(м²·с), рассчитывается по формуле (12.27)

$$I_{\text{опт}} = \frac{1}{Q_{\text{охл}}} \left(\sqrt{\frac{Q_{\text{зап}} q_{\text{вн}}}{\tau_0}} + q_{\text{вн}} \right) = \\ = \frac{1}{2600} \left(\sqrt{\frac{7789 \cdot 45}{20}} + 45 \right) = 0,068 \frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Время тушения $\tau_{\text{т}}$ находится по формуле (12.25):

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{7789}{0,068 \cdot 2600 - 45} + 20 \approx 79 \text{ с}.$$

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

$$q_{\text{уд}} = 0,068 \cdot 79 \approx 5,4 \text{ л/м}^2.$$

Пример 9.

Сравнить эффективность тушения поверхности горячей древесины водой и жидким азотом при одинаковой интенсивности подачи $I = 0,25 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, если время свободного горения $\tau_{\text{гор}} = 16 \text{ мин}$, минимальное время охлаждения прогретого слоя $\tau_0 = 20 \text{ с}$, приведенная массовая скорость выгорания $v_{\text{м}}^{\text{пр}} = 0,007 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, внешний падающий тепловой поток $q_{\text{вн}} = 35 \text{ кВт/м}^2$. Удельную теплоту пиролиза принять равной 2800 кДж/кг , низшую теплоту

сгорания – 14000 кДж/кг. Охлаждающий эффект воды 2600 кДж/кг, азота – 199 кДж/кг. Средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}} c_p \approx 3,7$ кДж/(кг·К). Температура поверхности при горении $t_{\text{пов}} \approx 700$ °С; температура пиролиза $t_{\text{пир}} \approx 200$ °С.

Решение.

При одинаковой интенсивности подачи сравнить эффективность тушения можно по значению теоретического времени прекращения горения (12.25).

Величина $q_{\text{конв}}$, кВт/м², определяется по формуле (12.21):

$$q_{\text{конв}} = v_{\text{м}}^{\text{пр}} c_p (T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}) = 0,007 \cdot 3,7 \cdot (700 - 200) = 12,95 \text{ кВт/м}^2.$$

В расчетах $L_{\text{экз}}$ приближенно можно принимать равным 6 % от низшей теплоты сгорания

$$L_{\text{экз}} = 0,06 Q_{\text{н}} = 0,06 \cdot 14000 = 840 \text{ кДж/кг}.$$

Величина $Q_{\text{зап}}$ определяется по формуле (12.20):

$$Q_{\text{зап}} = [q_{\text{вн}} - v_{\text{м}}^{\text{пр}} (L - L_{\text{экз}}) - q_{\text{конв}}] \cdot \tau_{\text{гор}} = \\ = [35 - 0,007(2800 - 840) - 12,95] \cdot 15 \cdot 60 = 7497 \text{ кДж/м}^2.$$

При заданной интенсивности подачи теоретическое время тушения водой по формуле (12.25) составит:

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{7497}{0,25 \cdot 2600 - 35} + 20 = 32 \text{ с}.$$

Теоретическое время тушения жидким азотом равно

$$\tau_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{I \cdot Q_{\text{охл}} - q_{\text{вн}}} + \tau_0 = \frac{7497}{0,25 \cdot 199 - 35} + 20 = 528 \text{ с}.$$

Таким образом, способ тушения водой более эффективен, чем способ тушения жидким азотом.

Пример 10.

Определить критическую и оптимальную интенсивности подачи раствора пенообразователя в резервуар с горящим нефтепродуктом. Пена подавалась в течение 30 с тремя ГПС-200. Площадь резервуара 45 м². Толщина слоя пены после тушения составила 0,35 м. Производительность пеногенератора 4 л/с, кратность пены 70.

Решение.

1. По формуле (12.28) находится интенсивность подачи раствора:

$$I = g \cdot n / S_p = 4 \cdot 3 / 45 = 0,27 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

2. Интенсивность накопления пены рассчитывается по формуле (12.30):

$$I_{\text{нак}} = \frac{H \cdot 10^3}{\tau \cdot K_{\text{пены}}} = \frac{0,35 \cdot 10^3}{30 \cdot 70} = 0,17 \frac{\text{л}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

3. Критическая интенсивность подачи раствора находится по формуле (12.29)

$$I_{\text{кр}} = I - I_{\text{нак}} = 0,27 - 0,17 = 0,1 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

4. Строится график $g_{\text{уд}} = f(I)$.

Поскольку из практики известно, что $I_{\text{опт}} = (2 \dots 3)I_{\text{кр}}$, задаются следующие значения I : 0,18; 0,20; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28; 0,30; 0,32; 0,34 и 0,36 л/(м²·с). Принимается $B = 1$ с.

По формуле (12.32)

$$g_{\text{уд}} = I \cdot \tau_T = I \cdot B \frac{I + I_{\text{кр}}}{I - I_{\text{кр}}}$$

получаются значения $g_{\text{уд}}$ и для удобства заносятся в табл. 12.3.

Таблица 12.3

Результаты расчета

$I, \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
$g_{\text{уд}}, \text{ л}/\text{м}^2$	0,63	0,6	0,59	0,58	0,585	0,59	0,6	0,61	0,62	0,64

По результатам расчета строится график зависимости удельного расхода раствора пенообразователя от интенсивности подачи (рис. 12.3).

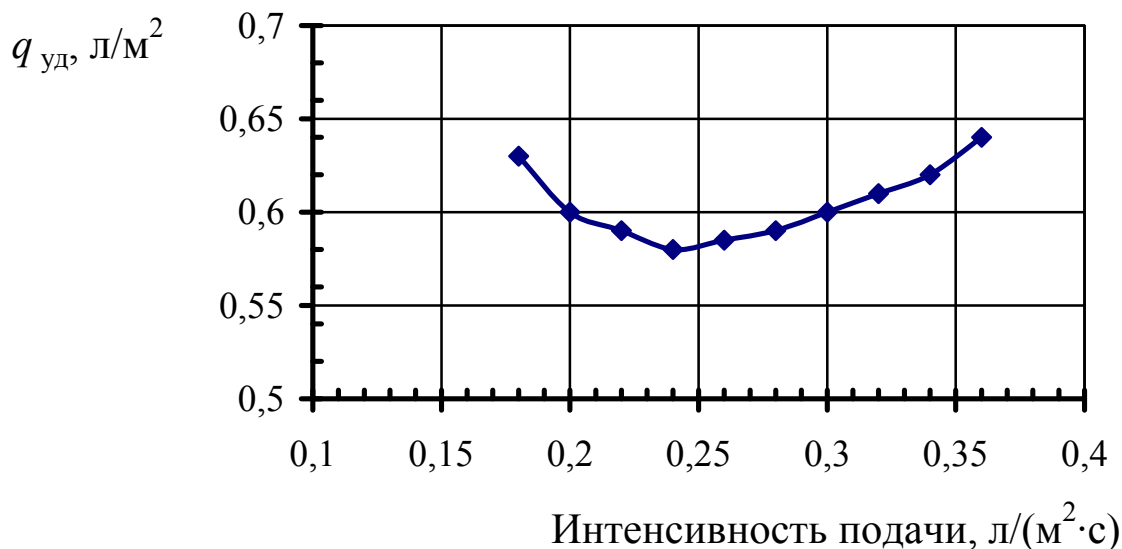


Рис. 12.3. Зависимость удельного расхода от интенсивности подачи

Таким образом, оптимальная интенсивность подачи равна 0,24 л/(м²·с).

Пример 11.

Рассчитать теоретическое время тушения пожара газовым огнетушащим составом в помещении объемом 150 м³, когда оно практически герметично и в случае открытия одного проема размерами: высота – 2 м, ширина – 1,5 м. Огнетушащая концентрация газа – 40,0 % (об.), плотность – 1,2 кг/м³, секундный расход – 0,5 кг/с. Температура пожара в момент начала тушения 110 °С. Плотность продуктов горения при 110 °С составляет 0,9 кг/м³. Температура воздуха 20 °С.

Решение.

Время тушения нейтральным газом (т.е. время достижения огнетушащей концентрации) в помещении заданного объема можно определить по формуле (12.35)

$$\tau_T = \frac{2V_{\text{пом}} \cdot a_{\text{огн}}}{2v_{\text{гос}} - v_{\text{пг}} \cdot a_{\text{огн}}}.$$

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

$$\tau_{\Gamma} = \frac{V_{\text{ПОМ}} \cdot a_{\text{ОГН}}}{v_{\text{ГОС}}}.$$

Секундный расход нейтрального газа должен быть выражен в м³/с:

$$v_{\text{ГОС}} = 0,5/1,2 = 0,42 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда расчетное время тушения составит:

$$\tau_{\Gamma} = \frac{150 \cdot 0,4}{0,42} = 143 \text{ с}.$$

Для второго случая, когда осуществляется газообмен через открытый проем, необходимо учитывать потери огнетушащего газа вместе с выходящими продуктами горения.

Плотность воздуха при 20 °С определяется по формуле (10.3)

$$\rho_{\text{В}} = 3,47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} = 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{101325}{273 + 20} = 1,2 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

Высота плоскости равных давлений h_0 находится по формуле (10.1)

$$h_0 = \frac{H_{\text{ПР}}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{ПР}}} + 1}} = \frac{2}{\sqrt[3]{\frac{1,2}{0,9} + 1}} = 0,95 \text{ м}.$$

Расход продуктов горения определяется по формуле (12.36)

$$\begin{aligned} v_{\text{ПР}} &= \frac{2}{3} \mu \cdot \frac{(S_{\text{ПР}} - S_1)}{\rho_{\text{ПР}}} \sqrt{2g(H_{\text{ПР}} - h_0)\rho_{\text{ПР}}(\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{ПР}})} = \\ &= \frac{2}{3} 0,65 \cdot \frac{(2 \cdot 1,5 - 1,5 \cdot 0,95)}{0,9} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot (2 - 0,95) \cdot 0,9 \cdot (1,2 - 0,9)} = \\ &= 1,79 \frac{\text{М}^3}{\text{С}}. \end{aligned}$$

Расчетное время тушения при наличии открытого проема равно:

$$\tau_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,42 - 1,79 \cdot 0,4} = 968 \text{ с}.$$

Пример 12.

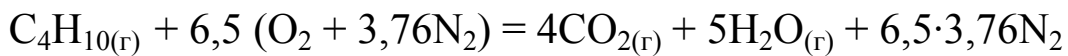
Определить значение МФК и безопасную концентрацию кислорода при разбавлении бутано-воздушной смеси азотом. Построить зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора.

Решение.

Минимальная флегматизирующая концентрация находится из условия минимальной адиабатной температуры горения стехиометрической бутано-воздушной смеси, где $T_r = 1500$ К.

Низшая теплота сгорания бутана $Q_H = 2665$ кДж/моль.

Записывается реакция горения бутана:



$$V_{CO_2} = 4 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{O_2} = 5 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{N_2} = 6,5 \cdot 3,76 = 24,44 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Значения теплоемкостей продуктов горения принимаются по табл. 12.1:

диоксид углерода – $5,08 \cdot 10^{-2}$ кДж/(моль·К);

вода – $3,99 \cdot 10^{-2}$ кДж/(моль·К);

азот – $3,18 \cdot 10^{-2}$ кДж/(моль·К).

Объем флегматизатора в предельной по горючести стехиометрической смеси, рассчитанный по уравнению (12.41), составит

$$V_{\phi} = \frac{2665 - (1500 - 273) \cdot (4 \cdot 5,08 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 3,99 \cdot 10^{-2} + 24,44 \cdot 3,18 \cdot 10^{-2})}{(1500 - 273) \cdot 3,18 \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 31,2 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Согласно формуле (12.42) минимальная флегматизирующая концентрация паров азота составит:

$$\Phi_{\phi} = \frac{V_{\phi} \cdot 100}{V_r + V_{\phi} + V_{N_2} + V_{O_2}} = \frac{31,2 \cdot 100}{1 + 31,2 + 24,44 + 6,5} = 49,4 \text{ \%}.$$

Концентрация горючего в смеси, соответствующая точке флегматизации ($\Phi_{r\phi}$) рассчитывается по уравнению (12.43):

$$\Phi_{r\phi} = \frac{V_r \cdot 100}{V_r + V_{\phi} + V_{N_2} + V_{O_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 31,2 + 24,44 + 6,5} = 1,6 \text{ \%}.$$

КПРП бутана в воздухе равны 1,86–8,14 % об. По полученным данным строится зависимость КПРП от концентрации флегматизатора (рис. 12.4).

МВСК (концентрация кислорода в точке флегматизации) рассчитывается по формуле (12.44):

$$\varphi_{\text{O}_2\text{ф}} = \frac{100 - \varphi_{\text{ф}}}{4,844} = \frac{100 - 49,4}{4,844} = 10,4 \text{ \%}.$$

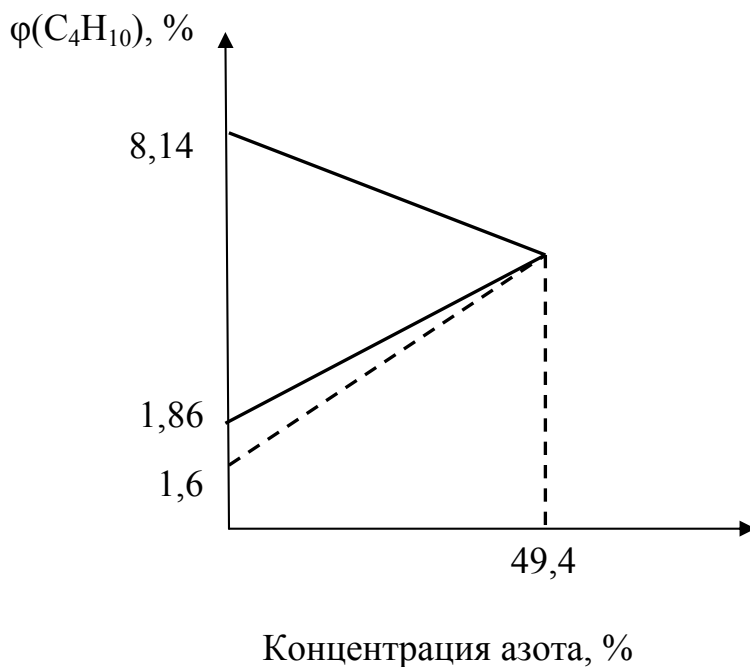


Рис. 12.4. Зависимость КПРП бутана от концентрации флегматизатора (азот)

Значение безопасной концентрации кислорода для бутано-воздушной смеси с азотом, рассчитанное по формуле (12.45) составит

$$\varphi_{\text{O}_2\text{без}} = 1,2 \cdot \varphi_{\text{O}_2\text{ф}} - 4,2 = 1,2 \cdot 10,4 - 4,2 = 8,28 \text{ \%}.$$

Задания для самостоятельной работы

1. Рассчитать теоретический удельный расход воды, л/м³, при тушении газового фонтана дебитом 3 млн м³/сут, если адиабатическая температура горения газа T_r (НКПР 5,28 % об., этана – 2,9 % об., пропана – 2,3 % об., низшая теплота сгорания метана 802 кДж/моль, этана – 1427 кДж/моль, пропана – 2044 кДж/моль).

Таблица 12.4

Исходные данные к задаче 1

Вар.	Содержание компонентов, % об.			$T_{г}$, °C
	Метан	Этан	Пропан	
1	92	6	2	1500
2	87	3	10	1950
3	85	11	4	1600
4	92	5	3	2250
5	82	12	6	1700
6	89	5	6	2450
7	90	7	3	1800
8	89	8	3	1550
9	93	5	2	1900
10	81	6	13	1750
11	91	7	2	2000
12	93	2	5	2350
13	84	6	10	2100
14	88	10	2	2150
15	95	2	3	2200
16	85	10	5	1850
17	93	2	5	2300
18	86	12	2	2050
19	94	4	2	2400
20	92	4	4	1650
21	87	7	6	2500
22	89	9	2	2000
23	86	5	9	2350
24	83	9	8	2100
25	91	4	5	2150
26	90	8	2	2200
27	80	10	10	1850
28	86	12	2	1950
29	90	4	6	1600
30	86	6	8	2250

2. Найти теоретическую оптимальную интенсивность подачи, требуемый секундный расход огнетушащего вещества, удельный расход, теоретическое время тушения и количество стволов, необходимых для тушения пожара древесины на заданной площади. Температурный интервал пиролиза древесины $200\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$, время охлаждения прогретого слоя $\tau_0 = 20\text{ с}$. Средняя удельная теплоемкость газов в интервале температур $T_{\text{пов}} - T_{\text{пир}}$, $c_p \approx 3,7\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Теоретический охлаждающий эффект воды при тушении «по поверхности» $Q_{\text{охл}} = 2600\text{ кДж}/\text{л}$. Исходные данные приведены в табл. 12.5.

3. Определить критическую и оптимальную интенсивность подачи раствора пенообразователя на тушение жидкости в резервуаре. Время подачи пенообразователя τ . Количество пеногенераторов n . Производительность пеногенератора q . Кратность пены K . Площадь резервуара S_p . Толщина слоя пены после тушения h . Исходные данные приведены в табл. 12.6.

4. Рассчитать минимальную флегматизирующую концентрацию инертного разбавителя, об. %, исходя из значения минимальной адиабатической температуры горения паровоздушной смеси вещества А при разбавлении ее флегматизатором Ф (табл. 12.7), а также минимальное взрывоопасное содержание кислорода и безопасную концентрацию кислорода.

Таблица 12.5

Исходные данные

№ П/П	$\nu_M^{пр},$ кг/(м ² ·с)	$S_{П},$ м ²	$Q_H,$ кДж/кг	$L,$ кДж/кг	$\tau_{гор},$ МИН	$q_{вн},$ кВт/м ²	$q_{ств},$ л/с, кг/с
1	0,0055	250	19000	2800	12	40	5,5
2	0,0060	100	19200	2820	10	42	3,6
3	0,0065	150	19500	2840	15	35	7,2
4	0,0070	80	19900	2720	6	32	3,5
5	0,0065	200	20000	2750	15	35	3,5
6	0,0070	120	20300	2780	8	40	7,0
7	0,0085	250	20800	2800	12	45	5,5
8	0,0080	100	21000	2820	10	42	7,2
9	0,0065	150	18500	2840	15	38	3,5
10	0,0060	80	18700	2720	6	30	3,6
11	0,0085	300	19000	2850	18	45	7,2
12	0,0070	140	19200	2880	7	38	3,5
13	0,0055	350	19500	2800	5	36	5,5
14	0,0060	280	19900	2820	8	28	7,2
15	0,0065	60	20000	2840	12	40	5,5
16	0,0070	150	20300	2720	10	45	3,6
17	0,0085	400	20800	2850	15	35	7,0
18	0,0080	120	21000	2880	6	42	3,5
19	0,0075	200	18500	2750	5	36	3,5
20	0,0080	120	18700	2780	8	38	7,0
21	0,0085	300	20000	2850	18	40	7,0
22	0,0080	140	20300	2880	7	36	3,5
23	0,0065	350	20800	2750	5	34	7,2
24	0,0060	60	21000	2780	8	35	3,6
25	0,0085	280	18500	2800	12	45	3,5
26	0,0070	150	18700	2820	10	32	5,5
27	0,0075	400	19000	2840	15	36	7,0
28	0,0080	120	19200	2720	6	38	3,6
29	0,0055	250	19500	2850	18	30	7,0
30	0,0060	100	19900	2880	7	32	3,6

Таблица 12.6

Исходные данные

Вар.	n	q , л/с	K	S_p , м ²	τ , с	h , см
1	2	2	120	45	80	25
2	3	20	120	110	120	55
3	4	6	110	456	100	45
4	3	6	100	345	150	40
5	2	6	80	100	120	30
6	1	2	120	30	85	35
7	2	6	110	75	70	24
8	3	20	120	125	55	60
9	3	6	80	130	155	50
10	4	2	120	120	65	38
11	3	20	120	255	90	43
12	2	6	110	79	70	48
13	3	2	100	43	50	53
14	2	6	80	105	80	29
15	3	2	120	210	125	32
16	4	6	110	180	105	62
17	3	20	120	190	55	22
18	2	6	100	76	60	33
19	1	6	80	25	50	20
20	5	6	100	344	75	58
21	3	6	80	275	125	27
22	2	2	120	60	105	32
23	1	20	120	35	155	37
24	2	6	110	85	65	42
25	3	2	100	130	110	47
26	4	6	80	200	70	57
27	3	2	120	115	150	52
28	2	6	110	90	80	21
29	1	20	120	38	120	23
30	2	6	100	65	100	28

Исходные данные

№ вар.	Название горючего вещества А	Флегматизатор Ф
1	н-пентан	азот
2	н-гексан	водяной пар
3	пропанол-1	диоксид углерода
4	бензол	азот
5	бутан	водяной пар
6	метанол	диоксид углерода
7	пропанон	азот
8	пентанол-1	диоксид углерода
9	пропен	диоксид углерода
10	диметиловый эфир	водяной пар
11	пропан	диоксид углерода
12	этин	азот
13	толуол	диоксид углерода
14	изопропилбензол	азот
15	этан	диоксид углерода
16	этанол	диоксид углерода
17	н-октан	азот
18	бутен-1	водяной пар
19	диэтиловый эфир	диоксид углерода
20	гексанол-1	азот
21	этилэтанوات (этилацетат)	диоксид углерода
22	бутанол-1	водяной пар
23	метан	диоксид углерода
24	этиленгликоль	азот
25	этен	азот
26	метаналь	водяной пар
27	этилбензол	диоксид углерода
28	глицерин	водяной пар
29	циклогексан	диоксид углерода
30	фенол	азот

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для освоения бакалаврами курса дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожара», для освоения магистрами заочной формы обучения курса «Пожаровзрывобезопасность». Содержит дополнительную информацию к теоретическому материалу лекций по данным дисциплинам. В каждой главе пособия изложены теоретические основы, подробное решение типовых задач, задания для самостоятельного контроля. В приложении представлены необходимые справочные данные. Предназначено для помощи студентам при проведении практических занятий, для получения соответствующих знаний, умений и навыков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учебное пособие. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. 256 с.
2. Бобков С. А., Бабурин А. В., Комраков П. В. Примеры и задачи по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожара»: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 98 с.
3. ГОСТ 12.1.044–89 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
4. Кольцов К. С., Попов Б. Г. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика. М.: Химия, 1978. 160 с.
5. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Ассоциация «Пожнаука», 2004. Ч. I. 713 с.
6. Корольченко А. Я., Корольченко Д. А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Ассоциация «Пожнаука», 2004. Ч. II. 774 с.
7. Марков В. Ф., Маскаева Л. Н., Гайнуллина Е. В., Беззапонная О. В. Сборник задач по курсу «Физико-химические основы развития и тушения пожаров»: учебное пособие. Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2011. 171 с.
8. Марков В. Ф., Маскаева Л. Н., Миронов М. П., Пазникова С. Н. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 274 с.
9. Маскаева Л. Н., Марков В. Ф. Теоретический расчет основных параметров горения и тушения пожаров газовых фонтанов: учебно-методическое пособие к курсовой работе по дисциплине «Физико-химические основы развития и тушения пожаров». Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. 28 с.
10. Пожарная опасность веществ и материалов. Справочник. М.: Химия, 1970. 336 с.
11. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: Руководство. М.: ВНИИПО, 2002. 77 с.
12. Самовозгорание химических веществ и материалов: учебное пособие / С. В. Пестриков, О. Ю. Исаева, Ф. Ф. Султанов, В. П. Перминов. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2013. 86 с.
13. Физико-химические основы развития и тушения пожара: учебное пособие / О. Ю. Исаева, С. В. Пестриков, Ф. Ф. Султанов, В. П. Перминов; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2014. 159 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1**Плотность, коэффициент теплопроводности, изобарная теплоемкость
и коэффициент температуропроводности различных материалов**

Наименование материала	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·град)	C_p , кДж/(кг·град)	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с
Асбест листовой	770	0,116	0,816	0,186
Бетон	2 300	1,279	1,130	0,622
Глина огнеупорная	1 850	1,035	1,089	0,051
Дуб	800	0,207	1,758	0,147
Земля (влажная)	1700	0,657	2,010	0,192
Каменный уголь	1400	0,186	1,310	0,103
Кирпич красный	1800	0,768	0,879	—
Кирпич огнеупорный	1900	0,814	0,837	0,514
Песок (сухой)	1500	0,326	0,795	2,740
Штукатурка известковая	1600	0,698	0,837	—
Алюминий	2670	204,000	0,921	86,700
Латунь	8600	85,000	0,377	33,800
Медь	8800	384,000	0,381	112,500
Олово	7230	64,000	0,221	41,100
Свинец	11400	35,000	0,130	23,600
Сталь углеродистая	7900	45,000	0,461	14,700
Чугун	7220	63,000	0,502	17,000

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Линейная скорость распространения горения на некоторых объектах

Объекты, материалы	Линейная скорость распространения горения, м/мин
<i>Административные здания</i>	1–1,5
<i>Больницы:</i> здание II степени огнестойкости здание III степени огнестойкости	0,6–1,0 2,0–3,0
<i>Жилые дома</i> (здание III степени огнестойкости)	0,5–0,8
<i>Лесопильные цехи:</i> здание III степени огнестойкости здание V степени огнестойкости	1,0–3,0 2,0–5,0
<i>Склады:</i> 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
<i>Сушильные отделения кожзавода</i> (здание III степени огнестойкости)	1,5–2,2
Сгораемые покрытия больших площадей (в т. ч. пустоты)	1,7–3,2
<i>Типографии</i> (здание III степени огнестойкости)	0,5–0,8
<i>Театр</i> (сцена)	1,0–3,0
<i>Холодильники</i>	0,5–0,7
<i>Цехи</i> текстильного производства деревобработывающего комбината	0,3–0,6 1,0–1,6
<i>Древесина</i> (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
Волокнистые материалы во взрыхленном состоянии	7,0–8,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Константы, определяющие критические условия самовозгорания веществ

Горючий материал	A_p	A_e	n_p	n_e
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Опилки сосновые	1,855	2,296	0,219	0,096
Плита торфяная	1,760	2,271	0,248	0,117
Сено	2,103	2,311	0,109	0,058
Солома пшеничная	2,185	2,301	0,067	0,035
Хлопок	2,018	2,332	0,140	0,057
Торф фрезерный	1,781	2,396	0,264	0,180
Мука ржаная	1,815	2,360	0,235	0,130
Лигнин	1,749	2,302	0,232	0,329
Ледерин	1,174	2,210	0,470	0,180
Ионообменная смола СГ №30	2,146	2,350	0,106	0,048
Диспергатор НФ	1,997	2,432	0,156	0,154
Бутиловый ксантогенат калия	1,853	2,196	0,133	0,132
Полиаки	1,956	2,230	0,113	0,100
Товарные дрожжи	1,867	2,254	0,184	0,078
Бактериальные препараты				
Витамин В ₂	1,716	2,140	0,220	0,300
Полимицин	1,762	2,332	0,275	0,208
Изип	1,744	2,100	0,177	0,098
Кормарин	1,531	2,185	0,310	0,212
Фитобактериомицин	1,937	2,353	0,204	1,175
Красители				
Дисперсный алый Ж	1,894	2,198	0,146	0,096
Дисперсный бордо 2с	2,046	2,268	0,073	0,100
Дисперсный красно-коричневый	1,922	2,259	0,144	0,059
Дисперсный фиолетовый 4к	1,928	2,182	0,100	0,071

Окончание прил. 3

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Азопигмент желтый светопроочный 23В	1,983	2,396	0,144	0,175
Азопигмент бордо ЖВ	2,124	2,298	0,093	0,092
Азопигмент ярко-красный ЖВ	2,023	2,323	0,142	0,054
Нигрозин спирторастворимый	1,708	2,254	0,220	0,260
Кислотный фиолетовый С	2,117	2,248	0,060	0,024
Цианол голубой 4 «З»	1,793	2,181	0,167	0,178
Кубозоль «Серый С»	2,009	2,340	0,100	0,225

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Температура самовоспламенения некоторых предельных углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$	$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,4	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,5	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,6	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	493	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	476
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	560	8,0	488	11,0	478	14,0	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	477	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	477	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	477	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	477	14,9	476
—	—	—	—	—	—	15,0	475

Температура самовоспламенения некоторых предельных одноатомных спиртов в зависимости от средней длины углеродной цепи

l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K
2,0	737	4,4	610	6,8	545	9,2	518
2,1	736	4,5	606	6,9	543	9,3	517
2,2	734	4,6	602	7,0	542	9,4	516
2,3	732	4,7	599	7,1	540	9,5	516
2,4	730	4,8	595	7,2	539	9,6	515
2,5	728	4,9	592	7,3	537	9,7	514
2,6	725	5,0	588	7,4	536	9,8	513
2,7	721	5,1	585	7,5	535	9,9	513
2,8	716	5,2	582	7,6	534	10,0	512
2,9	711	5,3	579	7,7	533	10,5	509
3,0	706	5,4	577	7,8	531	11,0	507
3,1	696	5,5	574	7,9	530	11,5	506
3,2	693	5,6	572	8,0	529	12,0	505
3,3	636	5,7	569	8,1	528	12,5	505
3,4	678	5,8	567	8,2	527	13,0	504
3,5	669	5,9	564	8,3	526	13,5	504
3,6	658	6,0	562	8,4	525	14,0	503
3,7	649	6,1	560	8,5	524	14,5	503
3,8	642	6,2	557	8,6	523	15,0	502
3,9	634	6,3	555	8,7	522	15,5	502
4,0	628	6,4	553	8,8	521	16,0	501
4,1	623	6,5	551	8,9	520	16,5	501
4,2	619	6,6	549	9,0	519	17,0	500
4,3	614	6,7	547	9,1	519	17,5	500

Температура самовоспламенения некоторых ароматических углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

l_{cp}	$T_{\text{св}}, \text{K}$	l_{cp}	$T_{\text{св}}, \text{K}$	l_{cp}	$T_{\text{св}}, \text{K}$
-2	843	-	-	-	-
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	718	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1	835	1	712	3	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0	819	2	703	4	695

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

**Температуры кипения, теплоты образования и сгорания
некоторых органических веществ**

Вещество	Температура кипения, °С	Теплота образования, кДж/моль	Теплота сгорания, кДж/моль
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
ацетальдегид (этаналь)	20,2	-166,36	1192,48
ацетон (пропанон, диметилкетон)	56,5	-217,57	1821,28
анилин (аминобензол, фениламин)	184,13	109	3016
н-амиловый спирт (пентанол-1)	138	-302,5	3383,6
бензол	80,1	82,9	3169,4
бутанол-1 (н-бутиловый спирт)	117	-274,6	2728
н-гексан	68,74	-167,2	3887
н-гексиловый спирт (гексанол-1)	155,7	-319,8	4044,6
н-гептан	98,43	-187,7	4501
глицерин (пропантриол-1,2,3)	290	-668,6	1483
1,2-дихлорэтан	83,5	-129,7	1076
диэтиловый эфир (этоксиэтан)	34,5	-252,2	2531
изобутиловый спирт (2-метилпропанол-1)	107,8	-283,2	2723,4
изопентан (2-метилбутан)	27,85	-154,5	3264
изопропиловый спирт (пропанол-2)	82,3	-272,4	2051,4
изопропилбензол (кумол)	152,4	-21,5	5608,9
м-ксилол (1,3-диметилбензол)	139	-28,4	5608,9
о-ксилол (1,2-диметилбензол)	144,4	-24,4	4376
п-ксилол (1,4-диметилбензол)	138,3	-24,4	4375
метилпропилкетон (пентанон-2)	103,3	-258,6	2918
н-октан	125,66	-208	5116
н-пентан	36	-146,4	3272

Окончание прил. 5

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
н-пропиловый спирт (пропанол-1)	97,8	-257,7	2067,4
стирол (винилбензол)	145	155,6	4438,8
формальдегид (метаналь)	-19,5	-115,9	570,78
хлорбензол	132	51,4	3074,6
хлорэтан	12,2	-111,72	1251
циклогексан	80,7	-123,13	3689
этилацетат (этилэтаноат)	77	-442,9	2078
этилбензол	136,2	29,9	4386,9

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Значения констант уравнения Антуана (из прил. 1 НПБ 105–95).

Давление насыщенного пара приведено в кПа

Вещество	Химическая формула	Константы уравнения Антуана		
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Ацетальдегид	C ₂ H ₄ O	6,31653	1093,537	233,413
Ацетон	C ₃ H ₆ O	6,37551	1281,721	237,088
Анилин	C ₆ H ₇ N	6,04622	1457,02	176,195
н-амиловый спирт	C ₅ H ₁₂ O	6,3073	1287,625	161,330
Бензол	C ₆ H ₆	5,61391	902,275	178,099
		6,10906	1252,776	225,178
н-бутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	8,72232	2664,684	279,638
н-гексан	C ₆ H ₁₄	5,99517	1166,274	223,661
н-гексиловый спирт	C ₆ H ₁₄ O	6,17894	1293,831	152,631
		7,23663	1872,743	202,666
н-гептан	C ₇ H ₁₆	6,07647	1295,405	219,819
Глицерин	C ₃ H ₈ O ₃	8,177393	3074,220	214,712
1,2-Дихлорэтан	C ₂ H ₄ Cl ₂	6,78615	1640,179	259,715
Диэтиловый эфир	C ₄ H ₁₀ O	6,12270	1098,945	232,372
Изобутиловый спирт	C ₄ H ₁₀ O	7,83005	2058,392	245,642
Изопентан	C ₅ H ₁₂	5,91799	1022,551	233,493
Изопропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	7,51055	1733,00	232,380
Изопропилбензол	C ₉ H ₁₂	6,06756	1461,643	207,56
м-ксилол	C ₈ H ₁₀	6,13329	1461,925	215,073
о-ксилол	C ₈ H ₁₀	6,28893	1575,114	223,579
п-ксилол	C ₈ H ₁₀	6,25485	1537,082	223,608
Метиловый спирт	CH ₄ O	7,3527	1660,454	245,818
Метилпропилкетон	C ₅ H ₁₀ O	6,98913	1870,4	273,2
Метилэтилкетон	C ₄ H ₈ O	7,02453	1292,791	232,340
н-октан	C ₈ H ₁₈	6,09396	1379,556	211,896
н-пентан	C ₅ H ₁₂	5,97208	1062,555	231,805
н-пропиловый спирт	C ₃ H ₈ O	7,44201	1751,981	225,125

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Стирол	C_8H_8	7,06542	2113,057	272,986
Толуол	C_7H_8	6,0507	1328,171	217,713
Формальдегид	CH_2O	5,40973	607,399	197,626
Хлорбензол	C_6H_5Cl	6,38605	1607,316	235,351
Хлорэтан	C_2H_5Cl	6,11140	1030,007	238,612
Циклогексан	C_6H_{12}	5,96991	1203,526	222,863
Этилбензол	C_8H_{10}	6,35879	1590,660	229,581
Этиленгликоль	$C_2H_8O_2$	8,13754	2753,183	252,009
Этиловый спирт	C_2H_6O	7,81158	1918,508	252,125
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	6,22672	1244,951	217,881

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура, °С	Теплосодержание $\Delta H \cdot 10^{-2}$, кДж/м ³						Температура, °С
	O ₂	N ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	
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