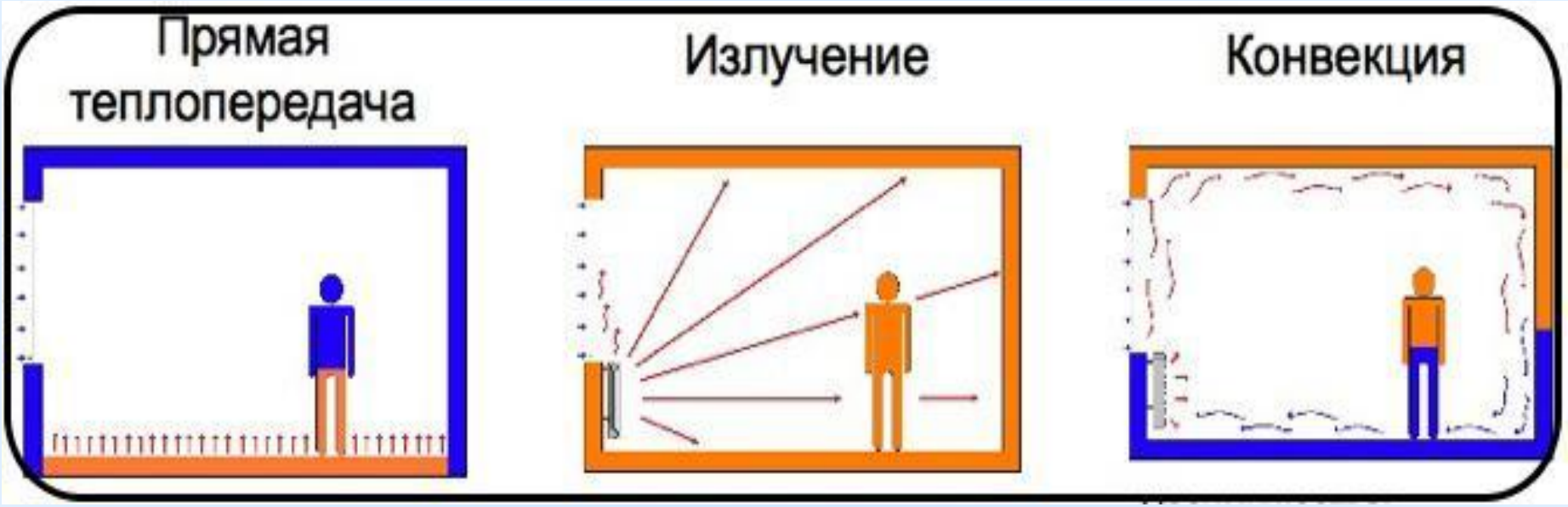
Раздел №2 «ПОЖАР КАК ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ. ЕГО ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ»

Тема №3: «ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ГАЗООБМЕНА НА ПОЖАРЕ»

Основные процессы, протекающие на пожаре


Прямая теплопередача
Излучение
Конвекция

Теплопроводность

Теплопроводность – процесс передачи тепла от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном соприкосновении за счёт хаотического теплового движения молекул или атомов. Преобладает при низких температурах. Определяет интенсивность тепловых потоков в твердых материалах.

Поток тепла (**q**) за счёт теплопроводности, определяется **законом Фурье**:

$$q_{\text{т}} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (\text{Вт/м}^2),$$

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

$\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры.

Коэффициент теплопроводности характеризует способность вещества передавать тепловую энергию. Это справочная величина, но ее значение зависит от температуры.

Коэффициенты теплопроводности веществ

Вт/м•град			
Алюминий	210	**Кирпич**	1,30
Вода	0,50	**Озокерит**	68
Воздух сухой	0,024	**Латунь**	110
Железо (сталь)	60	**Медь**	390
Жировая клетчатка	0,20	**Мышечная ткань**	0,50
Кожа человека	0,25	**Сухожилия**	0,46
Кость	0,11	**Резина**	0,12

Для стационарного установившегося режима теплопередачи количество теплоты (кДж), переданное за счет теплопроводности через слой вещества толщиной x площадью сечения S за время τ, может быть рассчитано по формуле

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot S \cdot \tau,$$

здесь ΔT – температурный напор или разность температур $(T_1 - T_2)$ между граничными плоскостями теплопроводящего слоя.

Задача 1. *В результате внутреннего пожара температура внутренней поверхности стены помещения толщиной 125 мм повысилась до 200°С. Какова величина теплового потока через стену, если материал стены − кирпич, сталь? Температура внешней поверхности стены равна 20 °С. Коэффициент теплопроводности кирпича − $\lambda_{кирп.}$ = 0.69 Вт/(м·К), стали $\lambda_{стали}$ = 45.8 Вт/(м·К).*

Решение:

Для стационарного установившегося режима тепловой поток (Вт/м^2), передаваемый за счет теплопроводности через слой вещества толщиной *x* площадью сечения S*m*, может быть рассчитан по формуле:

$$q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T / x, \quad Вт,$$

где λ − коэффициент теплопроводности имеет размерность Вт/(м·К), зависит от вида материала и от температуры, являясь справочной величиной;

ΔТ – разность температур между граничными плоскостями слоя.

Определим поток тепла, обусловленный теплопроводностью через 1 м^2 кирпича и стали:

$q_{кирп.}$ = [0.69×(473 − 293) ×1]/ 0,125 = 993.6 Вт (Дж/с)

$q_{сталь}$ = [45.8×(473 − 293) ×1]/ 0,125 = 65952 Вт (Дж/с).

$$n = \frac{q_{стали}}{q_{кирп.}} = \frac{65592}{993.6} = 66.4\,раз$$

Т.е. через сталь поток тепла выше в 66,4 раза, чем через кирпич.

Дополнительное задание: *Рассчитать, на сколько градусов нагреется внутренняя поверхность стены помещения из силикатного кирпича толщиной 380 мм в результате внутреннего пожара, если коэффициент теплопроводности материала 0,736 Вт/(м· К), а начальная значение температуры в помещении 25 °С. Значение теплового потока через стену составляет 850 Вт.*

Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен - распространение тепла в пространстве совокупным действием конвекции и теплопроводности.

- Имеет место на всех стадиях пожара, преобладает в его начале, когда уровень теплового излучения еще не высок.
- Конвективные потоки могут возникать и при изменении агрегатного состояния вещества, например, при кипении жидкости.

Конвекция – это перенос тепла в жидкостях и газах при движении макрочастиц среды (потоком вещества) за счёт градиента температуры, массы или плотности.

Конвекция бывает *естественная* (за счёт силы Архимеда) и *вынужденная* (при работе вентиляции или др. устройств).

Сила Архимеда

$$F_A = V_{возд}\, g\, (\rho_{возд} - \rho_{газа}), \quad [Н]$$

Количественно процесс конвективного теплопереноса описывается уравнением **Ньютона**:

$$q_к = \alpha_к \cdot \Delta T \cdot S \quad [Вт] \qquad или$$

$$Q_{конв} = \alpha_к \, \Delta T \, S \, \tau \qquad [кДж]$$

где $\alpha_к$ – *коэффициент теплоотдачи* или конвекционной теплопередачи, Вт/(м$^2 \cdot$К);

ΔT – разность температур между нагретыми газами и окружающими телами ($T - T_о$).

При естественной конвекции $\alpha_к$ = 5-50 Вт/(м^2 К)

При вынужденной конвекции $\alpha_к$ = 100-250 Вт/(м^2 К)

Задача 2. *Определить количество теплоты, сообщенной конвекцией от пламени спички в течение 10 с деревянному стержню площадью сечения 1 см^2=10^{-4} м^2 и время, за которое деревянный стержень воспламенится. Температура пламени 600 ^{o}C, поверхности стержня 20 ^{o}C. Коэффициент теплопередачи для ламинарного пламени спички $\alpha_к$ = 30 Вт/м^2·К.*

Решение: Воспользуемся уравнением Ньютона для расчёта количества теплоты: $Q_к = q_к \cdot \tau = \alpha_к \cdot \Delta T \cdot S \cdot \tau = 30 \times 10^{?4} \times (873 ? 293) \times 10 = 17.4$ Дж.

Это соответствует тепловому потоку $q_к$ =17.4 Дж:10 с = 1.74 Дж/с (Вт). В пересчете на 1 м^2 деревянного стержня тепловой поток составит 1.74 Вт/10$^{?4}$ м^2 =17,4 кВт/м^2. Для древесины возгорание наступает при тепловом потоке $q_к$, равном 10÷12 кВт/м^2. Рассчитаем время, за которое воспламенится деревянный стержень площадью сечения 1 см^2:

$$t = \frac{12,0}{17,4} \cdot 10 \approx 7 \text{ секунд}.$$

Дополнительное задание: *Определить коэффициент теплопередачи ламинарного пламени стеариновой свечи, значение температуры пламени которой 1300 ^{o}C, деревянному стержню площадью сечения 10 см^{2}, если известно, что количество теплоты, переданное деревянному стержню, составило 500 кДж, исходная значение температуры стержня 20 ^{o}C.*

Передача тепла на пожаре излучением

Излучение (**лучистый теплообмен**) – это перенос тепла посредством электромагнитных волн видимой и инфракрасной части спектра (0,4–100 мкм)

Не требует промежуточной среды между источником и приемником тепла.

Преобладает при высоких температурах, а также если диаметр очага пожара больше 0,3 м.

Большая часть излучения испускается мельчайшими частицами сажи, образующимися почти во всех диффузионных пламенах. Основным источником теплового излучения является дым

Количество излучаемого тепла определяется по уравнению **Стефана-Больцмана**:

$$q_л = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S \qquad [Вт/м^2]$$

где ε - степень черноты излучающего тела ($\varepsilon_{сажи} = 0{,}96$; $\varepsilon_{стали} = 0{,}066$ и т.д.)

$\sigma = 5{,}67\ 10^{-8}$ Вт/(м^2 К^4) – постоянная Стефана-Больцмана

Значение теплового потока, падающего на 1 м^2 облучаемой поверхности E может быть рассчитано по формуле:

$$E = \frac{\varepsilon \cdot \sigma (T_1^4 - T_0^4) \cdot S \cdot \cos\theta}{\pi \cdot r^2}, \qquad [кДж]$$

Задача 3. *Какова величина теплового потока, передаваемого излучением от нагретой поверхности площадью 2 м^2 при температуре 100°С, 1200°С, на расстоянии 1 м, 7м? Степень черноты поверхности ε = 0.9, температура окружающей среды 20°С.*

Решение: Согласно эмпирическому уравнению Стефана-Больцмана, суммарная энергия, излучаемая телом, пропорциональна T^4, где T – температура в ^{o}K. Отсюда количество теплового потока, передаваемого излучением перпендикулярно поверхности источника, определяется из выражения

$$q_л = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S,$$

Для оценки теплового потока на каком-либо расстоянии R необходимо также учитывать угол падения тепловых лучей $\varphi = 0$ град:

$$q = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot \cos\varphi}{\pi R^2}.$$

$$q_{100,1м} = \frac{0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot (373^4 - 293^4) \cdot 1}{3.14 \cdot 1^2} = 6156\ \text{Вт/м}^2;$$

$$q_{100,7м} = \frac{0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot (373^4 - 293^4) \cdot 1}{3.14 \cdot 7^2} = 126\ \text{Вт/м}^2;$$

$$q_{1200,1м} = \frac{0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot (1473^4 - 293^4) \cdot 1}{3.14 \cdot 1^2} = 2522\ \text{кВт/м}^2;$$

$$q_{1200,7м} = \frac{0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot (1473^4 - 293^4) \cdot 1}{3.14 \cdot 7^2} = 51.5\ \text{кВт/м}^2.$$

Задача 4. *В процессе развития пожара в помещении среднеобъемная температура через 5 мин составила 100 °С, а через 20 мин. 700 °С. Как изменится доля радиационной составляющей теплопереноса к холодной стенке помещения (20 °С)? Принять коэффициент теплопередачи конвекцией равным 10 Вт/м^2. Степень черноты пламени 0.8.*

Решение:

Согласно эмпирическому уравнению Стефана-Больцмана: $q_л = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S$,

Процесс конвективного теплопереноса - уравнение Ньютона: $q_к = \alpha_к \cdot \Delta T \cdot S$

Площадь, на которую воздействует тепловой поток, принимаем равной 1 м^2.

При 100 °С : $q_к = 10 \times (100-20) = 800$ Вт/м^2;

$q_л = 0.8 \times 5{,}67 \cdot 10^{-8} \times (373^4 - 293^4) = 543{,}7$ Вт/м^2;

$q_\Sigma = q_к + q_л = 800 + 543{,}7 = 1343{,}7$ Вт/м^2,

доля излучения составляет 543, 7: 1343,7= 0.405 (40.5 %).

При 700 °С : $q_к = 10 \times (700-20) = 6800$ Вт/м^2;

$q_л = 0.8 \times 5{,}67 \cdot 10^{-8} \times (973^4 - 293^4) = 40322$ Вт/м^2;

$q_\Sigma = q_к + q_л = 6800 + 40322 = 47122$ Вт/м^2,

доля излучения составляет 40322: 47122= 0,856 (85,6 %).

Доля радиационной составляющей теплопереноса к холодной стенке помещения повысится от 40,5 до 85,6 %.

Дополнительное задание: *На каком расстоянии от пламени мазута (значение температуры пламени 980 ^{o}C, степень черноты 0,93), горящего в резервуаре диаметром 6 м, значение лучистого теплового потока составляет 1050 кДж, угол падения тепловых лучей 0°.*

Основные закономерности газообмена

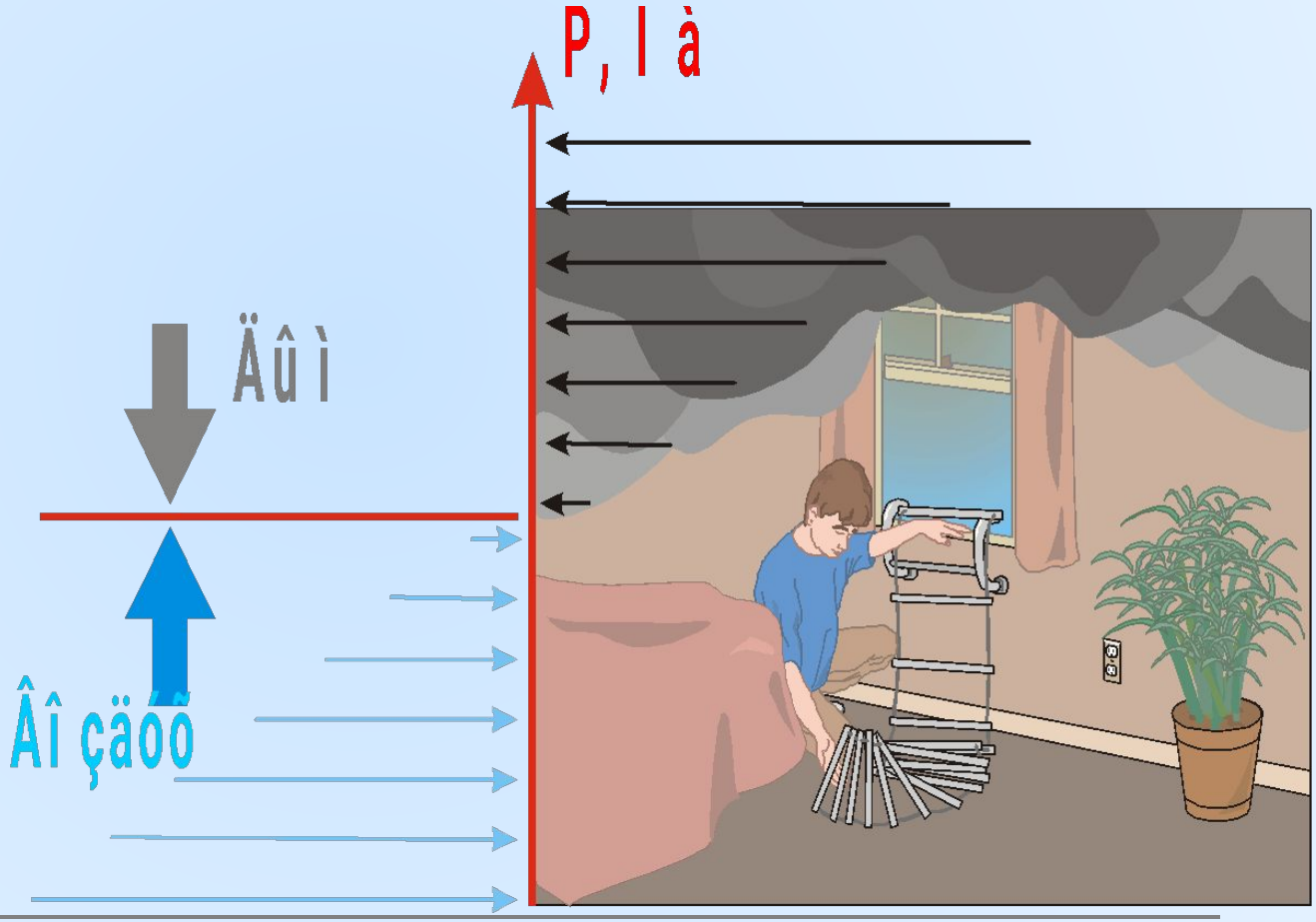
Количественная характеристика газообмена - его ***интенсивность*** $I_г$ - отношение массы воздушного потока, входящего в помещение, к площади пожара.

Это масса воздуха ($\overline{m}_в$), поступающего в единицу времени на единицу площади пожара ($S_п$),

$$I_г = \frac{\overline{m}_в}{S_п \tau}$$

кг/(с м^2)

Плоскость, в которой избыточное давление будет равно нулю - плоскость равных давлений или ***нейтральная зона*** (НЗ).



Положение нейтральной зоны относительно проема :

$$h_0 = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}}} + 1} \qquad h_0 = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{в}}}} + 1}$$

где Н – высота проема, м;

f_1 и f_2 - площади приточных и вытяжных отверстий, м^2

Если нижняя отметка проема находится на расстоянии *C* от пола, то:

$$h_0 = \frac{H}{\sqrt[3]{\frac{\rho_в}{\rho_г} + 1}} + C$$

Коэффициент избытка воздуха

$$\alpha = \frac{G_{в}^{ф}}{G_{в}^{тр}}$$

$$G_{в}^{тр} = V'_{m} \cdot S_{п} \cdot V_{в}^{0} \cdot \rho_{в}$$

$$G_{в} = \frac{2}{3} S_{пр} \sqrt{H}\, \mu\, \rho_{в} \sqrt{2g \frac{(\rho_{в} - \rho_{г})}{\rho_{в}} \left[1 + \left(\frac{\rho_{в}}{\rho_{г}} \right)^{1/3} \right]^{-3}}$$

где μ – коэффициент расхода проема (приводится в гидравлических справочниках);

h – высота над уровнем пола, м;

$S_{пр}$ – площадь проемов;

$V_{в}^{0}$ – объем воздуха теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг горючего вещества, м^3/кг;

$\rho_{в}$ – плотность воздуха;

V'_{M} – приведённая массовая скорость выгорания.

$$\alpha = \frac{\mu \cdot h \cdot S_{пр}}{V'_{m} \cdot S_{n} \cdot V^{o}_{в}}$$

Для экспериментальных и оценочных расчетов α определяют по процентному содержанию кислорода в продуктах горения:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \varphi_{O_2}}$$

Задача 5. *Рассчитать требуемый расход воздуха при горении в помещении ацетона в емкости диаметром 1,5 м, если приведенная массовая скорость выгорания 0,1 кг/(м²с). Температура окружающей среды 20 ⁰С, давление нормальное.*

Решение:

Расчетная формула для определения требуемого расхода воздуха имеет вид:

$$G_{в}^{пр} = v_{м}^{0} S_{п} V_{в} \rho_{в}$$

Площадь резервуара составляет:

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

Для расчёта теоретического объёма воздуха необходимо записать уравнение реакции горения вещества и уравнять его.

$$C_3H_6O + 4O_2 + 4 \cdot 3{,}76N_2 = 3CO_2 + 3H_2O + 4 \cdot 3{,}76N_2$$

$$V_t = \frac{22{,}4 \cdot P_0 \cdot T}{T_0 \cdot P} = \frac{101{,}3 \cdot 22{,}4 \cdot 293}{273 \cdot 101{,}3} = 24 \ м^3 / кмоль$$

$$V_{В}^{теор} = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \cdot V_t}{n_{ГВ} \cdot M_{ГВ}} = \frac{(4 + 4 \cdot 3{,}76)24}{1 \cdot 58} = 7{,}8 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Плотность воздуха для данных условий можно рассчитать согласно следующей формуле или установить по справочным данным:

$$\rho_{в} = 3{,}47 \cdot 10^{-3} \frac{P}{T} = 3{,}47 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{101325}{293} = 1{,}19 \text{ кг/м}^3$$

Требуемый расход воздуха равен:

$$G_{в}^{0} = 0{,}1 \cdot 7{,}8 \cdot 1{,}766 \cdot 1{,}19 = 1{,}6 \text{ кг/с}$$

Задача 6. *Определить площадь пожара $S_п$ в помещении, при которой среднеобъёмная концентрация кислорода в продуктах горения достигнет 16%. Фактический расход поступающего воздуха $G_в$ составляет 1,6 кг/с, приведённая массовая скорость выгорания $v_м^{пр}$ равна 0,06 кг/(м^{2}с), теоретический объём воздуха $V_в^0$ - 4,2 м^3/кг, плотность воздуха $\rho_в$ - 1,2 кг/м^3.*

Решение:

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

$$\alpha = G_В/G_В^0$$

Требуемый расход воздуха $G_В^0$ рассчитывается по формуле 2.1:

$$G_в^{пр} = v_м^0 S_п V_в \rho_В$$

Отсюда формула расчёта площади пожара приобретает вид:

$$S_п = \frac{G_в}{\alpha v_м^{пр} \rho_в V_в^0}$$

Коэффициент избытка воздуха связан с концентрацией кислорода формулой:

$$\alpha \approx \frac{21}{21-\varphi_{o_2}} = \frac{21}{21-16} = 4,2 \cdot$$

Тогда площадь пожара равна:

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

Дополнительные задачи:

1. *Определить положение плоскости равных давлений при пожаре в помещении если температура наружного воздуха 10°С, температура пожара 340°С, высота оконного проёма равна 1,5 м.*

2. *Оценить среднеобъёмную температуру газовой среды внутри помещения, если газообмен протекает через один дверной проём, высотой 2,2 м. Высота плоскости равных давлений 1,0 м, температура воздуха 25° С.*

3. *Определить среднеобъёмную концентрацию кислорода в продуктах горения, если фактический расход воздуха, поступающего в помещение, равен 1,4 кг/с, требуемый - 0,45 кг/с.*

Параметры пожара

Площадь пожара, *S*п (м^2) - площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость

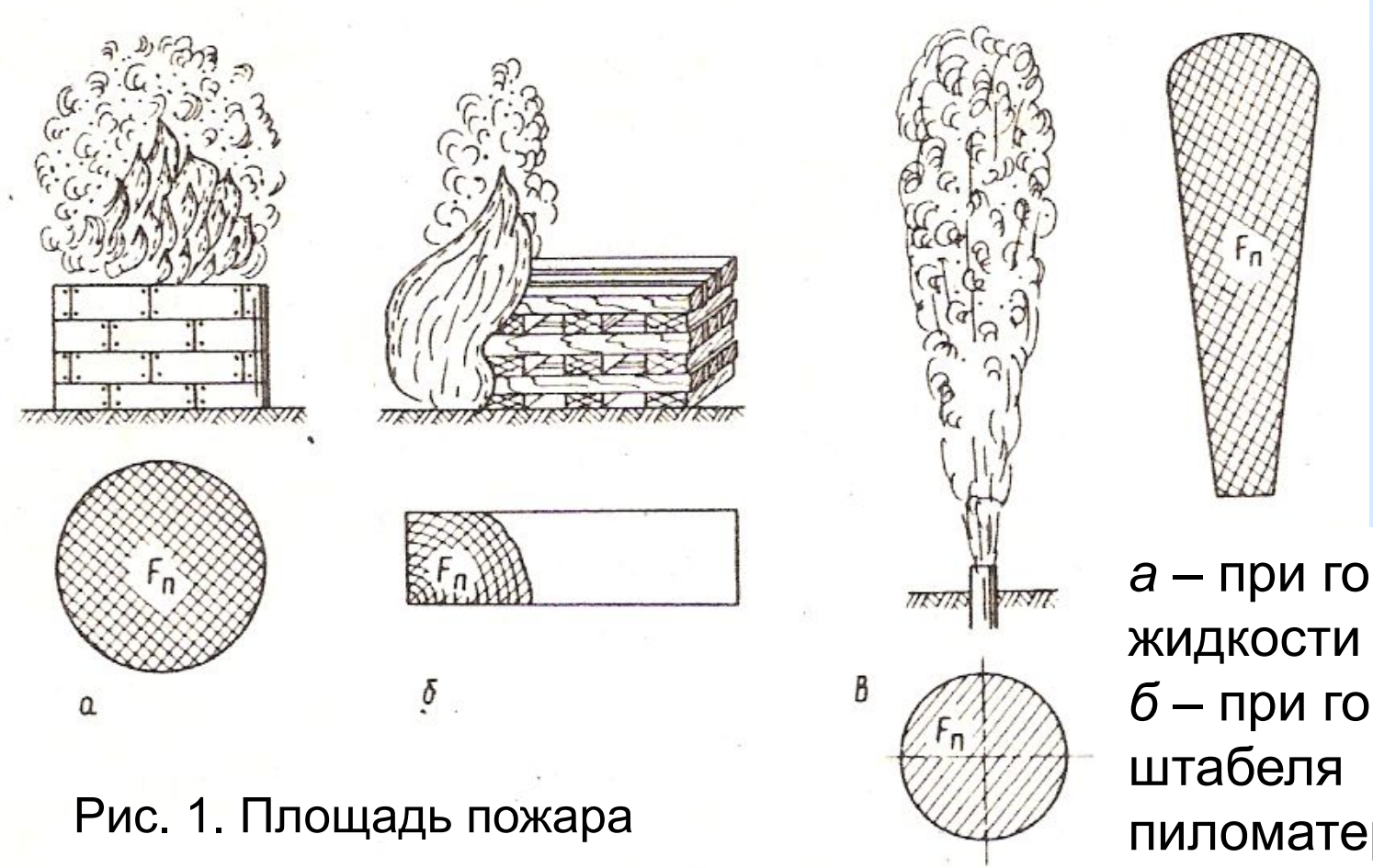


Рис. 1. Площадь пожара

а – при горении жидкости в резервуаре;
б – при горении штабеля пиломатериалов;
в – при горении газонефтяного фонтана

- **Площадь поверхности горения** $S_{ПГ}$ –реальная площадь горючего, которая участвует в горении.
- т.е. выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме.

- **Линейная скорость распространения пожара (горения),** $V_л$ (м/с) – это путь, который проходит фронт пламени по поверхности горючего материала в единицу времени.
- Линейная скорость распространения пожара определяет его площадь.
- $V_г > V_ж > V_{тв}$

Скорость выгорания горючих веществ и материалов - определяет интенсивность тепловыделения и температуру пожара, интенсивность его развития и др. параметры.

Массовая скорость выгорания (абсолютная) - масса вещества или материала, выгоревшая (перешедшая в газообразное состояние) в единицу времени V_M (кг/с).

Зависит от агрегатного состояния вещества или материала.

Для твердых горючих материалов зависит от отношения площади проемов ($S_{пр}$), через которые осуществляется газообмен, к площади пожара $S_{пр}/S_п$.

Например, для древесины при уменьшении площади проемов скорость выгорания снижается.

- Перевод объемной (линейной) скорости в массовую осуществляется по формуле:

$$V_м = V_л \cdot \rho$$

Коэффициент поверхности горения ($К_{ПГ}$) – отношение площади поверхности горения к площади пожара $K_{ПГ} = \frac{S_{ПГ}}{S_П}$.

Массовая скорость выгорания ($\upsilon_м$, кг/с) – это масса пожарной нагрузки, выгоревшая в единицу времени. По физическому смыслу для твердых и жидких веществ этот параметр пожара представляет собой скорость газификации горючего. Он показывает, какая масса твердых горючих материалов или жидкости переходит в газообразное состояние в единицу времени.

Приведенная массовая скорость выгорания ($\upsilon_м^{пр}$, кг/с · м^2) - масса горючего вещества, выгорающая в единицу времени с единицы площади пожара

$$\upsilon_м^{пр} = \frac{\upsilon_м}{S_п}.$$

Удельная массовая скорость выгорания ($\overline{\upsilon_м}$, кг/с · м^2) – масса горючего вещества, выгорающая в единицу времени с единицы площади поверхности горения:

$$\overline{\upsilon_м} = \frac{\upsilon_м}{S_{пг}}.$$

Интенсивность тепловыделения (теплота пожара) ($q_п$, кДж/с = кВт) – это количество тепла, выделяющееся на пожаре в единицу времени:

$$q_п = \beta \cdot \upsilon_м \cdot Q_н,$$

где β - коэффициент недожога.

Задача 7. *Определить массовую скорость выгорания материала при площади пожара 10 и 20 м^2, если табличное значение приведенной массовой скорости выгорания 0,014 кг/(м^{2}с).*

Решение:

Приведенная массовая скорость выгорания ($\upsilon_{м}^{пр}$) − это массовая скорость выгорания, приведенная к единице площади пожара $S_П$. Отсюда:

$$\upsilon_{м}^{пр} = \frac{\upsilon_{м}}{S_{п}}, \text{ следовательно, } \quad \upsilon_{м} = \upsilon_{м}^{пр} \cdot S_{п}.$$

При $S_П$ = 10 м^2 $\quad \upsilon_м = 0{,}014 \cdot 10 = 0{,}14$ кг/с.

При $S_П$ = 20 м^2 $\quad \upsilon_м = 0{,}014 \cdot 20 = 0{,}28$ кг/с.

Задача 3. Рассчитать удельную массовую скорость выгорания ($\overline{\upsilon_м}$) штабеля, сложенного из деревянных брусьев, если за 15 минут пожара ($\tau_п$) его масса (m) уменьшилась на 15 %. Штабель состоит из пяти рядов (n), в каждом ряду размещаются десять брусьев (k). Размеры бруса а×а×l = 0,1×0,1×2 м. Плотность древесины (ρ) составляет 450 кг/м^3. Определить коэффициент поверхности горения ($K_{пг}$) данного штабеля.

Решение:

Для определения удельной массовой скорости выгорания $\overline{\upsilon_м}$, определяемой по формуле

$$\overline{\upsilon_м} = \frac{\upsilon_м}{S_{пг}},$$

необходимо найти массовую скорость выгорания штабеля ($\upsilon_м$), сложенного из деревянных брусьев, и их площадь поверхности горения ($S_{пг}$).

Массовая скорость выгорания ($\upsilon_м$) – это масса (m) твердого горючего материала или жидкости, выгоревшего в единицу времени (τ) $\upsilon_м = \frac{m}{\tau}$.

Массу (m) выгоревших деревянных брусьев (рисунок 1) можно определить, как произведение доли выгоревшей массы штабеля (η), плотности древесины (ρ), объема одного бруса (V), количества брусьев в одном ряду (k) и числа рядов брусьев в штабеле, то есть:

$$m = \eta \cdot \rho \cdot V \cdot k \cdot n = 0{,}15 \cdot 450 \cdot 0{,}1^2 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 5 = 67{,}5 \text{ кг}.$$

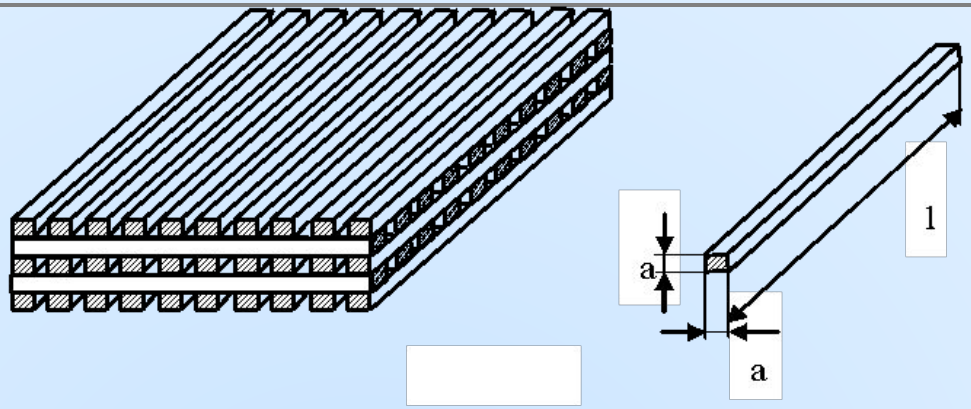


Рисунок 1 – Иллюстрация к задаче 3.

При длительности пожара 15 мин массовая скорость выгорания ($\upsilon_м$) составит:

$$\upsilon_м = \frac{67{,}5}{15 \cdot 60} = 0{,}075 \text{ кг/с}.$$

Площадь поверхности горения ($S_{пг}$) характеризует реальную площадь горючего, которая участвует в горении, то есть выделяет горючие газы при пиролизе или испарении, а также взаимодействует с окислителем в гетерогенном режиме.

При определении площади поверхности горения стоит отметить, что в конструкции штабеля (рисунок 1) имеются скрытые ($S_{скр}$), не участвующие в процессе горения поверхности, и открытые поверхности ($S_{откр}$). Поэтому открытая поверхность (поверхность горения $S_{пг}$) рассчитывается как разность общей поверхности всех брусьев $S_{общ}$ и скрытой поверхности брусьев в штабеле $S_{скр}$: $S_{пг} = S_{откр} = S_{общ} - S_{скр}$

Общая поверхность штабеля представляет сумму площадей всех граней одного бруса, умноженную на количество всех брусьев в штабеле $k \cdot n$:

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

Скрытая поверхность штабеля состоит из граней брусьев, находящихся в нижнем ряду (alk) и соприкасающихся с поверхностью земли, а также участков брусьев, соприкасающихся друг с другом ($2a^2k^2(n-1)$):

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

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

Тогда поверхность горения штабеля будет равна:

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

а удельная массовая скорость выгорания:

$$\overline{\upsilon_м} = \frac{\upsilon_м}{S_{пг}} = \frac{0{,}075}{31} = 0{,}0024 \text{ кг/(м}^2\text{с)}.$$

Площадь пожара ($S_п$), представляющая площадь проекции зоны горения на горизонтальную плоскость, для штабеля деревянных брусьев размером $a\times a\times l$ = 0,1×0,1×2 м, составит: $S_п = l^2 = 2^2 = 4 \text{ м}^2$

Коэффициент поверхности горения, представляющий отношение площади поверхности горения к площади пожара, равен:

$$K_{пг} = \frac{S_{пг}}{S_п} = \frac{31}{4} = 7{,}75.$$

Задача 9. *Определить интенсивность тепловыделения на пожаре при горении материала, имеющего низшую теплоту сгорания 14000 кДж/кг, если табличное значение приведенной массовой скорости выгорания равно 0,02 кг/(м^{2}с), площадь пожара – 10 м^2, коэффициент полноты сгорания – 0,8.*

Решение:

Интенсивность тепловыделения на пожаре рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot \upsilon_{\text{м}} \cdot Q_{\text{н}} .$$

С учетом формулы $\upsilon_{\text{м}}^{\text{пр}} = \dfrac{\upsilon_{\text{м}}}{S_{\text{п}}}$ получим:

$$q_{\text{п}} = \beta \cdot \upsilon_{\text{м}}^{\text{пр}} \cdot S_{\text{п}} \cdot Q_{\text{н}} ; \quad q_{\text{п}} = 0{,}8 \cdot 0{,}02 \cdot 10 \cdot 14000 = 2240 \text{ (кДж/с) кВт.}$$

Ответ: интенсивность тепловыделения на пожаре равна 2240 кВт.

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

Задача 10. *На сколько опустится уровень мазута в резервуаре за τ = 28 минут горения. Плотность (ρ) мазута составляет 940 кг/м^3, удельная массовая скорость выгорания равна 0,035 кг/(с ·м^2).*

Решение: Обозначим изменение уровня жидкости – Δh.

Объем выгоревшей жидкости (V) равен произведению площади зеркала жидкости $S = S_{пг}$ (площадь поверхности горения) на Δh (рисунок 2), с другой стороны, отношению массы выгоревшего вещества m на плотность ρ:

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

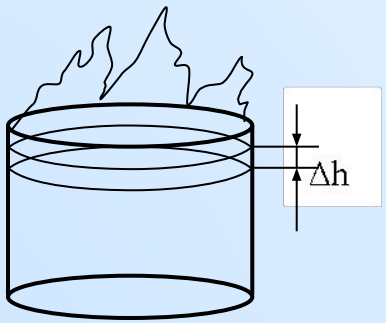


Рисунок 2

Тогда изменение уровня мазута можно определить, как:

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

Известно, что удельная массовая скорость выгорания ($\overline{\upsilon_м}$) с учетом выражений $\overline{\upsilon_м} = \upsilon_м / S_{пг}$ и $\upsilon_м = m/\tau$, определяется по формуле:

$$\overline{\upsilon_м} = \frac{\upsilon_м}{S_{пг}} = \frac{m}{\tau \cdot F_{пг}} = \frac{m}{\tau \cdot S}.$$

Отсюда масса выгоревшего вещества m равна:

$$m = \overline{\upsilon_м} \cdot \tau \cdot S.$$

Изменение уровня мазута находим, как:

$$\Delta h = \frac{m}{\rho \cdot S} = \frac{\overline{\upsilon_м} \cdot \tau \cdot S}{\rho \cdot S} = \frac{0{,}035 \cdot 28 \cdot 60}{940} = 0{,}063 \ \ м = 6{,}3 \ \ см.$$

Задача 11. *Определить уровень нижней границы гомотермического слоя (h) при горении нефти в резервуаре. Начальный уровень жидкости H = 10 м, время горения τ = 40 мин. Плотность данной нефти ρ = 750 кг/м^3, приведенная массовая скорость выгорания =0,045 кг/с·м^2, скорость нарастания гомотермического слоя 7·10^{-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 δ (рис 3).

Тогда $h = H - (\Delta H + \delta)$.

$\Delta H = \tau \cdot \upsilon_л$, м;

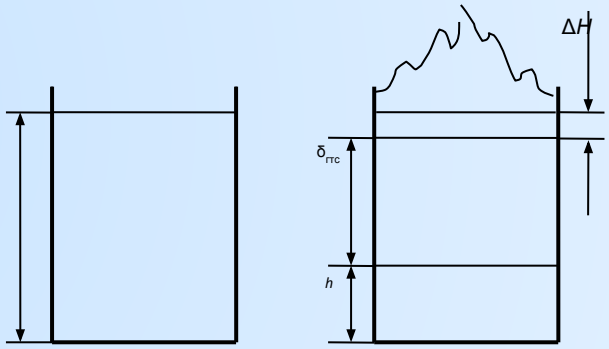
$\delta = \tau \cdot \upsilon_{гтс}$, м.

Здесь $\upsilon_л$ – линейная скорость выгорания; $\upsilon_л = \upsilon_м^{уд}/\rho = 0{,}045/750 = 6 \cdot 10^{-5}$, м/с.

Получаем:

$h = H - \tau(\upsilon_л + \upsilon_{гтс})$;

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



Ответ: уровень нижней границы гомотермического слоя при горении нефти в резервуаре равен 8,2 м.

Основным фактором, определяющим параметры пожара, является вид и величина **пожарной нагрузки**.

Пожарная нагрузка – это энергия, которая выделяется при горении веществ.

$$g = \beta \cdot Q_н \cdot m_{гв},$$

Удельная пожарная нагрузка

$$g = \Sigma (\beta \cdot Q_н \cdot m_{гв})/S$$

Горючая нагрузка - масса всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м^2 площади пола помещения, или площади, занимаемой этими материалами на открытой площадке:

$$P_{г.н} = \frac{\sum m_i}{S}$$

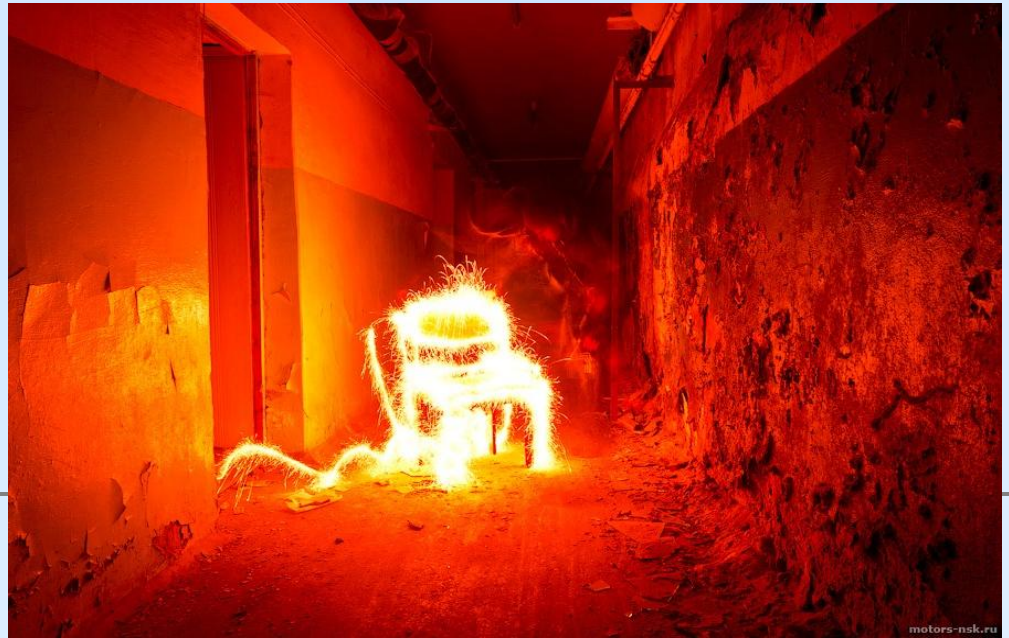
$P_{г.н.}$ – горючая нагрузка;

$\sum m_i$ – масса горючих и трудногорючих материалов, кг;

S - площадь пола помещения или открытой площадки, м^2 .

- Горючая нагрузка делится на ***постоянную*** (горючие и трудногорючие материалы, технологическое оборудование) и ***временную*** (сырье, готовая продукция).
- Общая горючая нагрузка помещения - сумма постоянной и временной нагрузки:

$$P_{общ} = P_{пост} + P_{врем}$$



Задача 12. *Определить удельную горючую нагрузку ($p_{ГН}$) и удельную пожарную нагрузку (g) в помещении площадью (S) 12 м^2. Пол в помещении выложен деревянным паркетом толщиной h, равной 2 см. Плотность древесины $\rho_{ДР}$, из которой изготовлен паркет, составляет 450 кг/м^3. В помещении имеется следующая мебель: деревянный шкаф массой 80 кг, стол – 30 кг, два стула по 7 кг каждый, диван массой 95 кг, состоящий из 70% древесины, 20% пенополиуретана и 10% кожи. Низшая теплота сгорания (Q_{Hi}) древесины составляет 16,5 МДж/кг, пенополиуретана – 24, 52 МДж/кг и кожи – 21,52 МДж/кг*

Решение:

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

Масса паркета равна: $m_П = \rho_{ДР} \cdot V_П = \rho_{ДР} \cdot S \cdot h = 450 \cdot 12 \cdot 0{,}02 = 108$ кг.

Масса древесины, пенополиуретана (ППУ) и кожи, из которых сделан диван, равны $m_{ДР} = 0{,}7 \cdot 95 = 66{,}5$ кг; $m_{ППУ} = 0{,}2 \cdot 95 = 19$ кг; $m_К = 0{,}1 \cdot 95 = 9{,}5$ кг.

Таким образом, удельная горючая нагрузка равна:

$$p_{ГН} = \frac{m_П + m_{ШК} + m_{СТОЛ} + m_{СТУЛ} + (m_{ДР} + m_{ППУ} + m_К)_{ДИВ}}{F} =$$

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

Удельная пожарная нагрузка равна:

$$g = \frac{(m_П + m_{ШК} + m_{СТОЛ} + m_{СТУЛ} + m_{ДИВ}^{ДР}) \cdot Q_Н^{ДР} + m_{ДИВ}^{ППУ} \cdot Q_Н^{ППУ} + m_{ДИВ}^{К} \cdot Q_Н^{К}}{F} =$$

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

Ответ: удельная горючая нагрузка - 27,25 кг/м^2; удельная пожарная нагрузка - 466,26 МДж/м^2.

Дополнительное задание: *В помещении площадью 50 м^2 сложен горючий материал в форме куба. Ребро куба 4 м, плотность материала 500 кг/м^3, низшая теплота сгорания 20000 кДж/кг, коэффициент полноты сгорания 0,7. Рассчитать удельную пожарную нагрузку помещения и коэффициент поверхности горения. Определить параметры пожара: массовую скорость выгорания, приведённую и удельную скорости выгорания; теплоту пожара, если за 120 минут горения масса материала уменьшилась на 10 %.*