Лекция №3.

Интегральная модель начальной стадии пожара. Критическая продолжительность пожара.

1. Постановка задачи. Основные предположения.
2. Вывод системы уравнений начальной стадии пожара. Предположение о теплопотерях.
3. Определение средних значений параметров ОФП. Понятие критических значений для средних величин параметров состояния.

1. В начальной стадии пожара, когда площадь открытых проемов в помещении еще мала, режим газообмена с окружающей средой имеет ряд особенностей. Наиболее важная особенность заключается в том, что процесс газообмена идет в одном направлении. Через все имеющиеся щели и проемы. <u>Газ только выходит из помещения, но воздух не поступает внутрь!</u> Это предположение позволяет в дифференциальных уравнениях пожара отбросить члены, содержащие расход воздуха, так как:

$$G_B=0 \qquad (1)$$

Кроме того, будем рассматривать помещения, степень негерметичности которых такова, что повышение давления практически не происходит, и оно остается постоянным, равным давлению наружного воздуха. Так что с достаточной точностью можно принять, что:

$$\frac{dP_m}{d\tau} = 0; \rightarrow \rho_m \cdot T_m = \rho_o \cdot T_o \qquad (2)$$

где ρ_o, T_o- плотность и температура среды перед пожаром;

ρ_m, T_m- соответственно средние значения плотности и температуры в рассматриваемый момент времени;

P_m- среднее давление в помещении.

Интервал времени, в течение которого наблюдается односторонний газообмен, является относительно небольшим. Средняя температура и концентрация кислорода за это время изменяются незначительно, поэтому можно считать, что величины η, D, L в этой стадии пожара остаются неизменными. Кроме того, примем, что $n_1 = n_2 = n_3 = m = 1$ и V=const.

2. С учетом сделанных допущений уравнения пожара на начальной стадии его развития принимают вид:

$$V\frac{d\rho_m}{dt} = \psi - G_r \qquad (3)$$

$$\psi \cdot Q_H^P \cdot \eta - C_p \cdot T_m \cdot G_r - Q_w = 0 \qquad (4)$$

$$V\frac{d\rho_1}{dt} = -\psi \cdot \alpha_1 \cdot \eta - \frac{\rho_1}{\rho_m} G_r \qquad (5)$$

$$V\frac{d\rho_2}{dt} = \psi\alpha_2\eta - \frac{\rho_2}{\rho_m} G_r \qquad (6)$$

$$V\frac{d\mu_m}{dt} = \psi D - \mu_m \frac{G_r}{\rho_m} \qquad (7)$$

В дальнейшем принимаем еще одно допущение:

$$C_p = C_{p\,\text{в}} = const \qquad (8)$$

Это допущение естественно для начальной стадии пожара, поскольку как состав, так и температура за малое время существенно не изменяются.

Для того чтобы получить аналитическое решение этих уравнений, сделаем еще одно предположение: отношение теплового потока в ограждения Q_w к тепловыделению в каждый момент времени есть величина постоянная и равная своему среднему значению на этом интервале времени:

$$\varphi = \frac{1}{t^*}\int_0^{t^*} \frac{Q_w}{Q_{пож}} dt \qquad (9)$$

здесь $Q_{\text{пож}} = \psi \cdot \eta \cdot Q_H^p$, время t^* означает окончание начальной стадии пожара. Величину φ называют коэффициентом теплопотерь. Уравнение энергии (4) при сделанном допущении принимает вид:

$$Q_H \cdot \psi \cdot \eta \cdot (1 - \varphi) - C_p \cdot T_m \cdot G_r = 0 \qquad (10)$$

Из этого уравнения следует выражение для массового G_r и объемного $\dot{V}_\text{Г}$ расходов выталкиваемых газов:

$$G_r = \frac{\psi \cdot Q_H^p \cdot \eta \cdot (1-\varphi)}{C_p \cdot T_m} \qquad (11)$$

$$\dot{V}_\text{Г} = \frac{\psi Q_H^p \eta (1-\varphi)}{C_p \cdot T_0 \rho_0} = \frac{\gamma - 1}{\gamma P_0} \cdot \psi \cdot Q_H^p \cdot \eta \cdot (1 - \varphi) \qquad (12)$$

3. С помощью последних выражений уравнения (3,5,6,7) можно преобразовать к виду:

$$V\frac{d\rho_m}{dt} = \psi\left[1 - \frac{\eta \cdot Q_H^p \cdot (1-\varphi)}{C_p \cdot \rho_0 \cdot T_0}\rho_m\right] \qquad (13)$$

$$V\frac{d\rho_1}{dt} = -\psi\cdot\eta\cdot\alpha_1\cdot\left[1+\frac{Q_H^p(1-\varphi)}{C_p\rho_0T_0\alpha_1}\rho_1\right] \quad (14)$$

$$V\frac{d\rho_2}{dt} = \psi\cdot\eta\cdot\alpha_2\cdot\left[1-\frac{Q_H^p(1-\varphi)}{C_p\rho_0T_0\alpha_2}\rho_2\right] \quad (15)$$

$$V\frac{d\mu_m}{dt} = \psi\cdot D\cdot\left[1-\frac{\eta Q_H^p(1-\varphi)}{C_p\rho_0T_0D}\mu_m\right] \quad (16)$$

Как видим, в результате сделанных допущений система уравнений (13)-(16) расщепилась, то есть решение каждого уравнения можно описывать самостоятельно. Каждое уравнение является уравнением с разделяющимися переменными и даже линейным.

Уравнение (13) можно еще более упростить, если учесть, что имеет место неравенство:

$$\frac{\eta Q_H^p(1-\varphi)}{C_pT_0\rho_0}\rho_m \gg 1 \quad (17)$$

то можно пренебречь единицей в квадратных скобках и тогда выражение (13) примет вид:

$$V\frac{d\rho_m}{dt} = -\psi\frac{\eta\cdot Q_H^p\cdot(1-\varphi)}{C_p\cdot\rho_0\cdot T_0}\rho_m \quad (18)$$

Разделим переменные и затем проинтегрируем правую и левую части уравнения, используя начальное условие $\rho_m = \rho_0$ при t=0.

$$\int_{\rho_0}^{\rho_m}\frac{d\rho_m}{\rho_m} = -\frac{\eta\cdot Q_H^p\cdot(1-\varphi)}{C_p\cdot\rho_0\cdot T_0\cdot V}\int_0^t\psi dt \quad (19)$$

где интеграл в правой части равен массе ГМ, сгоревшего к моменту t, то есть:

$$\int_0^t\psi dt = M_t \quad (20)$$

В зависимости от геометрических условий расширения очага горения во времени, выгоревшая масса равна:

$$M_t = \int_0^t\psi_{уд}\cdot\pi\cdot U_л^2\cdot t^2\cdot dt = \frac{\pi\cdot\psi_{уд}}{3}U_л^2\cdot t^3 \quad (21)$$

при круговом расширении пожара, где $\psi_{уд}$- удельная массовая скорость выгорания, кг/м^2*сек; $U_л$- линейная скорость распространения пламени по площади размещения пожарной нагрузки, м/сек.

Если процесс распространения пламени пожара по поверхности ГМ является линейным, то:

$$M_t = \frac{1}{2} b_г \cdot \psi_{уд} \cdot U_л \cdot t^2 \quad (22)$$

где $b_г$- ширина полосы горения М.

Если площадь горения постоянна, то:

$$M_t = F_г \cdot \psi_{уд} \cdot t \quad (23)$$

где $F_г$- постоянная площадь горения.

Все полученные формулы для расчета массы выгоревшего ГМ можно представить одной формулой:

$$M_t = A \cdot t^n \quad (24)$$

где $A = \begin{cases} \frac{\pi}{3} \psi_{уд} \cdot U_л^2 - \text{ при круговом распространении пожара по ГМ;} \\ \frac{1}{2} b_г \cdot \psi_{уд} \cdot U_л - \text{ при линейном распространении пожара по ГМ;} \\ F_г \cdot \psi_{уд} - \text{ при постоянной площади пожара } F_г. \end{cases}$

$$n = \begin{cases} 3 - \text{при круговом горении;} \\ 2 - \text{при линейном распространении пожара;} \\ 1 - \text{при постоянной площади горения.} \end{cases}$$

Подставляя выражение (24) в уравнения пожара с последующим интегрированием получим:

$$ln \frac{\rho_m}{\rho_0} = -\frac{A}{B} t^n \quad (25)$$

где $B = \frac{C_p \cdot \rho_0 \cdot T_0 \cdot V}{\eta(1-\varphi) \cdot Q_H^p}$

Из (25) получим выражение для изменения средней плотности и средней температуры со временем:

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = exp\left(-\frac{A}{B} t^n\right) \quad (26)$$

$$\frac{T_m}{T_0} = exp\left(\frac{A}{B} t^n\right) \quad (27)$$

Теперь перейдем к рассмотрению уравнения (14), описывающего процесс снижения парциальной плотности кислорода в помещении. Разделяя переменные и интегрируя с использованием начальных условий, получим:

$$\int_{\rho_{0\,1}}^{\rho_1} \frac{d\rho_1}{\left[1+\frac{Q_H^p\cdot(1-\varphi)}{C_p\rho_0 T_0\alpha_1}\rho_1\right]} = -\frac{\eta\alpha_1}{V}\int_0^t \psi dt \qquad (28)$$

где $\rho_{0\,1}$- начальное значение плотности кислорода в помещении, в ГОСТ 12.1.004-91 принимается $\rho_{0\,1} = 0{,}27\,\text{кг}/\text{м}^3$, а отношение $\frac{\rho_{0\,1}}{\rho_0} = 0{,}23$.

После интегрирования (28) с учетом (24) получается выражение:

$$ln\left[\frac{1+\frac{(1-\varphi)Q_H^p}{C_p\rho_0T_0\alpha_1}\rho_1}{1+\frac{(1-\varphi)Q_H^p}{C_p\rho_0T_0\alpha_1}\rho_{0\,1}}\right] = -\frac{\eta(1-\varphi)Q_H^p}{C_p\rho_0T_0V}\cdot A\cdot t^n \qquad (29)$$

Потенцируя и преобразуя (29) получим:

$$\rho_1 = \frac{B\eta\alpha_1}{V}\left\{\left(1+\frac{V}{B\eta\alpha_1}\rho_{0\,1}\right)\cdot exp\left[-\frac{A}{B}t^n\right]-1\right\} \qquad (30)$$

Аналогично после разделения переменных и интегрирования с учетом начального условия $\rho_{2\,0} = 0$ получим следующее выражение для парциальной плотности токсичного газа от времени:

$$\rho_{2=}\rho_*\left[1-exp\left(-\frac{A}{B}t^n\right)\right] \qquad (31)$$

где $\rho_* = \frac{C_pT_0\alpha_2}{(1-\varphi)Q_H^p}\rho_0$ – пороговая плотность, кг/м^3.

Действуя аналогично, получим выражение для оптической плотности дыма:

$$\mu_=\mu_*\left[1-exp\left(-\frac{A}{B}t^n\right)\right] \qquad (32)$$

где $\mu_* = \frac{C_p\rho_0T_0D}{\eta(1-\varphi)Q_H^p}$

Значение μ_* зависит от свойств ГМ. Например, для древесины при ее горении на открытом воздухе:

$$\mu_* \leq 5\text{Нп}\cdot\text{м}^{-1}$$

Отметим, что оптическая плотность и дальность видимости связаны соотношением:

$$l_{\text{вид}} = \frac{2{,}38}{\mu_m} \qquad (33)$$

Полученные формулы (27), (30), (31), (32) позволяют рассчитать процесс нарастания ОФП. Следует помнить, что эти соотношения применимы, если только отсутствует поступление воздуха в помещение. Это условие выполняется при соблюдении неравенства:

$$\frac{F_{\text{пр}}\sqrt{gH}}{V}t \leq 5 \qquad (34)$$

где $F_{\text{пр}}$- суммарная площадь открытых проемов м^2, Н- высота проемов.

Полученные формулы (27), (30)-(32) позволяют рассчитать критическую продолжительность пожара в помещениях, имеющих небольшие открытые проемы на начальной стадии пожара. Знание критической продолжительности времени развития пожара является необходимым в решении задачи эвакуации людей из помещения при возникновении в нем пожара.

Критическая продолжительность пожара- есть время достижения предельно допустимых для человека значений ОФП в зоне пребывания людей. С развитием пожара изменяется состояние среды, заполняющей помещение, при этом изменяются средние параметры состояния - температура, концентрация кислорода и токсичных газов, дальность видимости. Изменяются, конечно, и локальные значения этих параметров состояния.

Предельно допустимые значения параметров состояния в зоне пребывания людей (т.е локальные значения этих параметров достигают предельно допустимых значений) соответствуют некоторому состоянию среды в помещении с определенными значениями средних величин для этих параметров состояния. Эти значения называются средними критическими параметрами состояния. Так, например, если средняя температура среды достигла своего критического значения, то это значит, что в рабочей зоне температура газа достигла своего предельно допустимого значения 70^{0}С. Вопрос в том, какая существует связь между критическими значениями средних параметров состояния и предельно допустимыми локальными значениями параметров состояния в рабочей зоне зависит от характера распределения этих локальных параметров в пространстве помещения. Наиболее просто связь между критическими значениями средних параметров и их локальными значениями выглядит для случая, когда значения всех локальных параметров состояния отличаются только вдоль вертикальной координаты, а в горизонтальных плоскостях все величины имеют одно и то же значение. В ГОСТ 12.1.004-91 для этого случая определена формула:

$$\frac{\Phi_{\text{кр}}-\Phi_0}{\Phi_{\text{доп}}-\Phi_0} = \left[\frac{y}{H}exp\left(1{,}4\frac{y}{H}\right)\right]^{-1} \qquad (35)$$

где $\Phi_{кр}$ - критическое значение для средней величины любого параметра состояния составляющего ОФП;

$\Phi_{доп}$ - предельно допустимое значение ОФП в рабочей зоне;

Φ_0 - начальное значение ОФП;

y – координата рабочей зоны, отсчитываемая от поверхности пола;

H – высота помещения.