

## Лекция №5.

1. Зонная модель пожара в помещении. Постановка задачи для зонной модели.
2. Вывод уравнения движения припотолочной зоны.
3. Определение параметров состояния и ОФП в припотолочной зоне.

1. Зонные математические модели с основным используются для исследования динамики опасных факторов пожара в начальной стадии пожара. В начальной стадии распределение параметров состояния газовой среды по объему помещения характеризуется большой неоднородностью (неравномерностью). В этот период времени пространство внутри помещения можно условно поделить на ряд характерных зон с существенно различающимися температурами и составами газовых сред. Границы этих зон по мере развития пожара не остаются неподвижными. В течение времени геометрическая конфигурация зон меняется и сглаживается контрастное различие параметров состояния газа в этих зонах. В принципе, пространство внутри помещения можно разбить на любое число зон. Мы рассмотрим простейшую модель, которая применима, когда размер очага горения значительно меньше размеров помещения, то есть при локализованном на ограниченной площади горючем материале или для начальной стадии развития пожара.

Процесс развития пожара можно представить следующим образом. После воспламенения горючего материала, образующиеся газообразные продукты устремляются вверх, образуя над очагом горения конвективную колонку (струю). Достигнув потолка помещения, эта струя растекается, образуя припотолочный слой задымленного газа. Со временем толщина этого слоя увеличивается. В соответствии со сказанным, в объеме помещения можно выделить три характерные зоны: конвективную колонку над очагом пожара (Рис.1), припотолочный слой нагретого газа и воздушную зону с неизменными параметрами состояния, равными своим начальным значениям. Таким образом получается трехзонная модель пожара.

I- зона конвективной струи (конвективная колонка).

II- зона припотолочного нагретого газа.

III- зона холодного воздуха.

IV- зона наружного воздуха (атмосфера).

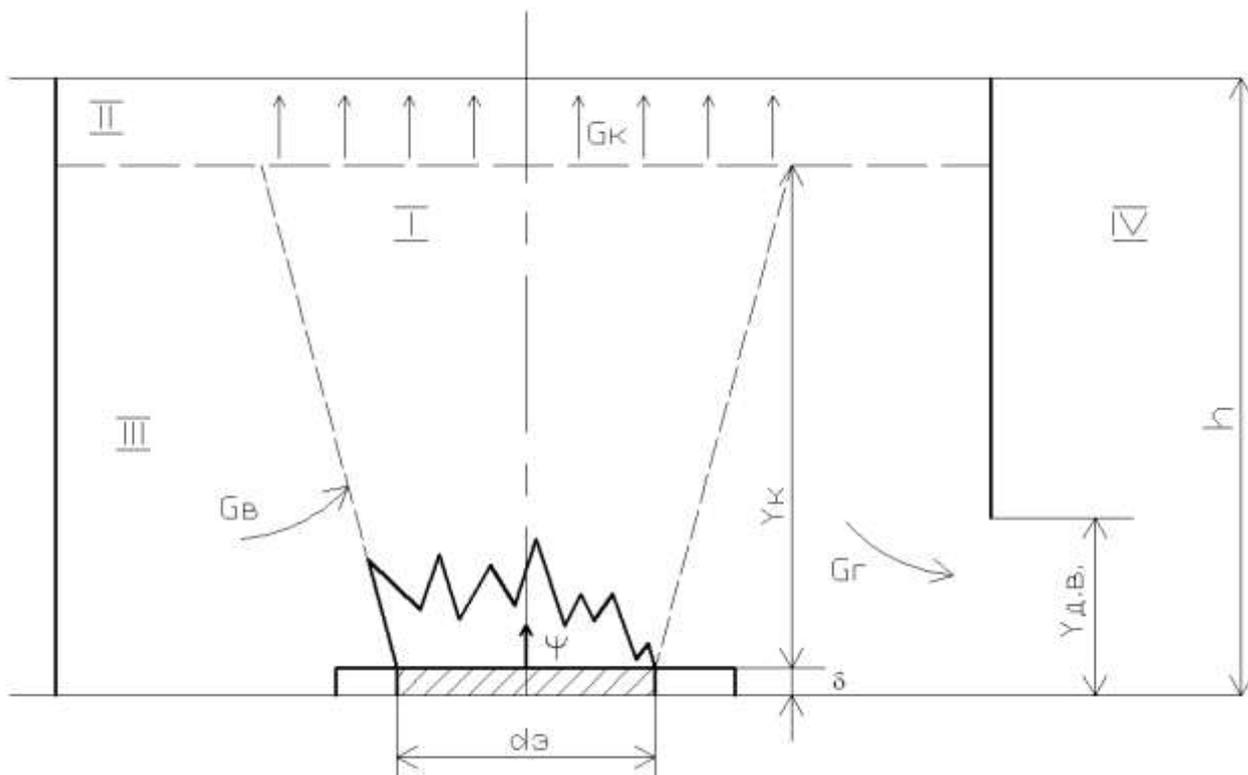


Рис.1 Схема трехзонной модели пожара.

На схеме использованы обозначения:

$y_k$ - координата нижней границы припотолочной зоны (она уменьшается), отсчитываемая от поверхности горения;  $y_{д.в.}$ - высота проема, через который вытесняется наружу газ (чаще всего это дверной проем);  $d_{э}$ - эквивалентный диаметр очага горения;  $h$ - высота помещения;  $G_k$ - поток газа, поступающего из конвективной колонки в припотолочную зону,  $кг \cdot с^{-1}$ ;  $G_B$ - поток воздуха, поступающего в колонку из зоны III,  $кг \cdot с^{-1}$ ;  $G_r$ - поток вытесняемого газа из помещения,  $кг \cdot с^{-1}$ ;  $\psi$ - скорость выгорания,  $кг \cdot с^{-1}$ ;  $\delta$ - расстояние от пола до поверхности горения, м.

Рассмотрим сначала первую фазу развития пожара. Под первой фазой подразумевается отрезок времени, в течение которого нагретые газы только накапливаются в припотолочной зоне, а вытесняется лишь холодный воздух, в момент времени, когда координата нижней границы припотолочной зоны  $y_k$  сравняется с  $y_{д.в.}$  первая фаза заканчивается.

Прежде всего рассмотрим  $I^{у0}$  зону. Теория свободной конвективной струи к настоящему времени детально разработана. Воспользуемся результатами этой теории:

$$T - T_0 = \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{C_p G} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{пож}} = \eta \psi Q_H^p = \eta \psi_{\text{уд}} Q_H^p F_{\Gamma}$ ;  $Q_{\text{пож}}$ - скорость тепловыделения, Вт;  $Q_H^p$ - теплота сгорания, Дж · кг<sup>-1</sup>;  $\psi_{\text{уд}}$ - удельная скорость выгорания, кг · м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>;  $F_{\Gamma}$ - площадь горения, м<sup>2</sup>;

$T_0$ - температура окружающего воздуха;  $T$ - средняя температура по сечению колонки на высоте  $y$ ;  $C_p$ - изобарная теплоемкость газа, Дж · кг<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup>;  
 $\chi = \frac{Q_{w1}}{Q_{\text{пож}}}$  – доля тепловой энергии, поступающей в ограждающие конструкции, от выделившейся в очаге горения;  $G$ - расход газов через сечение струи, отстоящее от поверхности горения на расстояние  $y$ , кг · с<sup>-1</sup>.  
 Этот расход выражается через параметры пожара:

$$G = 0,21 \left[ \frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}}}{C_p T_0} (1 - \chi) \right]^{1/3} (y + y_0)^{5/3} \quad (2)$$

$y$ - координата сечения колонки, отсчитываемая от поверхности горения, м;  $g$ - ускорение свободного падения, м · с<sup>-2</sup>;  $\rho_0$ - плотность окружающего воздуха из зоны III;  $y_0$ - расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения, м:

$$y_0 = 1,5 \sqrt{F_{\Gamma}} \quad (3)$$

С помощью формул (1-3) можно рассчитать расход газа из I зоны, поступающего во II зону, и его температуру. Для этого следует координату  $y$  в формулах (1-2) положить равной координате нижней границе припотолочной зоны  $y_k$ , где соответственно  $T = T_k$ , а  $G = G_k$ .

2. Рассмотрим теперь вторую зону (припотолочный слой нагретых газов).

Объем этой зоны в момент времени  $t$  равен:

$$V_2 = F_{\text{пот}}(h - y_k - \delta)$$

где  $F_{\text{пот}}$ - площадь потолка. Масса газа, заключенная во II зоне, составляет величину  $m_2 = \rho_2 V_2$ . Давление в зоне II практически не меняется и остается равным начальному значению, т.е.  $P_0$ . Внутренняя (тепловая) энергия II зоны составляет:

$$U_2 = C_V \rho_2 T_2 V_2 = \frac{C_V}{R} P_0 V_2 = \frac{1}{\gamma - 1} P_0 V_2$$

Уравнения материального баланса к энергии для II зоны применительно к первой фазе пожара:

$$\frac{d(\rho_2 V_2)}{dt} = G_k \quad (4)$$

$$\frac{d(C_V \rho_2 T_2 V_2)}{dt} = C_p T_k G_k - Q_{w2} - P_0 \frac{dV_2}{dt} \quad (5)$$

где  $\rho_2$ - средняя плотность во II зоне;  $T_2$ - средняя температура во II зоне;  $Q_{w2}$ - тепловой поток от припотолочного слоя газа в ограждения, кВт.

Параметры состояния  $T_2$  и  $\rho_2$  связаны между собой следующим уравнением:

$$\rho_0 T_0 = \rho_3 T_3 = \rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \quad (6)$$

Уравнение (6) следует из условия равенства давлений во всех зонах. Это условие является приближенным, но приемлемым для реальных пожаров. Используя уравнение (6) преобразуем (5):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{C_V}{R} P_0 V_0 \right) + P_0 \frac{dV_2}{dt} = C_p T_k G_k - Q_{w2}$$

или

$$P_0 \left( \frac{C_V}{R} \right) \frac{dV_2}{dt} = C_p T_k G_k - Q_{w2}$$

и окончательно

$$C_p \rho_0 T_0 \frac{dV_2}{dt} = C_p T_k G_k - Q_{w2} \quad (7)$$

Из уравнения (1) следует:

$$C_p T_k G_k = Q_{\text{пож}} - Q_{w1} + C_p T_0 G_k, \quad (8)$$

где  $Q_{w1} = \chi Q_{\text{пож}}$

Подставляя формулу (8) в (7), получим:

$$C_p \rho_0 T_0 \frac{dV_2}{dt} = Q_{\text{пож}} - Q_{w1} - Q_{w2} + C_p T_0 G_k$$

Примем, что  $\frac{Q_{w1} + Q_{w2}}{Q_{\text{пож}}} = \varphi = \text{const}$  (для первой фазы  $\varphi \approx 0,55$ ).

После дальнейших преобразований получим следующее выражение:

$$-F_{\text{пот}}\rho_0 \frac{dy_k}{dt} = \left[ (1 - \varphi) \frac{Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} + G_k \right] \quad (8a)$$

Подставив в это выражение (2), получим:

$$-\frac{dy_k}{dt} = \frac{(1-\varphi)}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} Q_{\text{пож}} + \frac{0,21}{\rho_0 F_{\text{пот}}} \left[ \frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{c_p T_0} \right]^{1/3} (y_k + y_0)^{5/3} \quad (9)$$

Отметим, что в этом уравнении:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_H^p F_{\Gamma}$$

Введя обозначения:

$$\frac{(1-\varphi)Q_{\text{пож}}}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} = \beta(t), \quad \frac{0,21}{F_{\text{пот}}} \left[ \frac{g Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{\rho_0 c_p T_0} \right]^{1/3} = \gamma(t)$$

Функции  $\beta(t)$  и  $\gamma(t)$  при горении твердых ГМ в момент времени  $t=0$  равны нулю, так как  $F_{\Gamma} \rightarrow 0$ .

Уравнение (9) принимает вид:

$$\frac{dy_k}{dt} + \gamma(y_k + y_0)^{5/3} + \beta = 0 \quad (10)$$

$$y_k(t=0) = h - \delta$$

Решение уравнения (10) при заданном начальном условии (6) ищется для интервала времени от  $t=0$  до  $t^*$ , где  $t^*$  - момент окончания первой фазы начальной стадии пожара. После того как найдена функция  $y_k(t)$ , находим  $G_k = f_i(t)$  согласно (2) и  $V_2 = (h - y_k)F_{\text{пот}}$ .

Из уравнения материального баланса получается:

$$\rho_2 V_2 = \int_0^t G_k dt \quad (11)$$

После преобразований из (11) получим:

$$\rho_2 = \frac{1}{F_{\text{пот}}[h - y_k(t) - \delta]} \int_0^t G_k(t) dt \quad (12)$$

После вычислений плотности  $\rho_2$  определяется средняя температура в припотолочном слое газа.

$$T_2 = T_0 \frac{\rho_0}{\rho_2} \quad (13)$$

Уравнение материального баланса для токсичного газа (продукт горения) во II зоне имеет вид:

$$\frac{d(\rho_{\text{II}}V_2)}{dt} = \psi L \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{II}}$  - парциальная плотность токсичного газа;  $L$  - количество (масса) токсичного газа, образующаяся при сгорании 1 кг горючего материала.

Из (14) следует:

$$\rho_{\text{II}} = \frac{1}{V_2} \int_0^t \psi(t) \cdot L \cdot dt = \frac{L}{V_2} \int_0^t \psi dt = \frac{L}{V_2} M_t \quad (15)$$

где  $M_t = \int_0^t \psi dt$  - количество сгоревшего ГМ к моменту времени  $t$ .

Уравнение дыма имеет вид:

$$\frac{d(\mu_2 V_2)}{dt} = D\psi \quad (16)$$

И, следовательно:

$$\mu_2 = \frac{1}{V_2} \int_0^t D\psi dt = \frac{DM_t}{V_2} \quad (17)$$

Рассмотрим частный случай, когда  $F_{\Gamma} = const, \delta = 0$ . Такое положение реализуется при горении жидкости, если пренебречь начальной нестационарной фазой горения. В этом случае:

$$Q_{\text{пож}} = \eta\psi_{\text{уд}} Q_H^p F_{\Gamma} = const$$

В этом случае  $G_k = B(y_k - y_0)^{5/3}$ , где  $B = 0,21 \left[ \frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}}(1-\lambda)}{c_p T_0} \right]^{1/3}$ .

Далее следует отметить, что из  $F_{\Gamma} = const$ , следует  $y_0 = const$  и при новых обозначениях:

$$\frac{(1-\varphi)Q_{\text{пож}}}{\rho_0 c_p T_0 F_{\text{пот}}} = C_1 = const; \quad \frac{0,21}{\rho_0 F_{\text{пот}}} \left[ \frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p T_0} \right]^{1/3} = C_2 = const$$

Следовательно, получается уравнение с разделяющимися переменными. С помощью этого уравнения рассчитывается изменение координаты нижней границы припотолочного слоя.