

Лекция №8

Газообмен с внешней средой.

1. Распределение давлений по высоте помещения при пожаре.
2. Плоскость равных давлений и режим обмена через проемы.
3. Расходы газов через проемы.

1. При пожаре происходит газообмен с окружающей средой через проемы (окна, двери, технологические отверстия и т. д.). Источником движения газа через проемы является перепад давлений, т.е. разность между давлением внутри помещения и давлением в окружающей среде.

Чтобы определить перепады давлений в проеме, прежде всего, необходимо установить законы распределения давлений по вертикали (по высоте) снаружи и внутри помещения. Используемые обозначения указаны на рис. 1

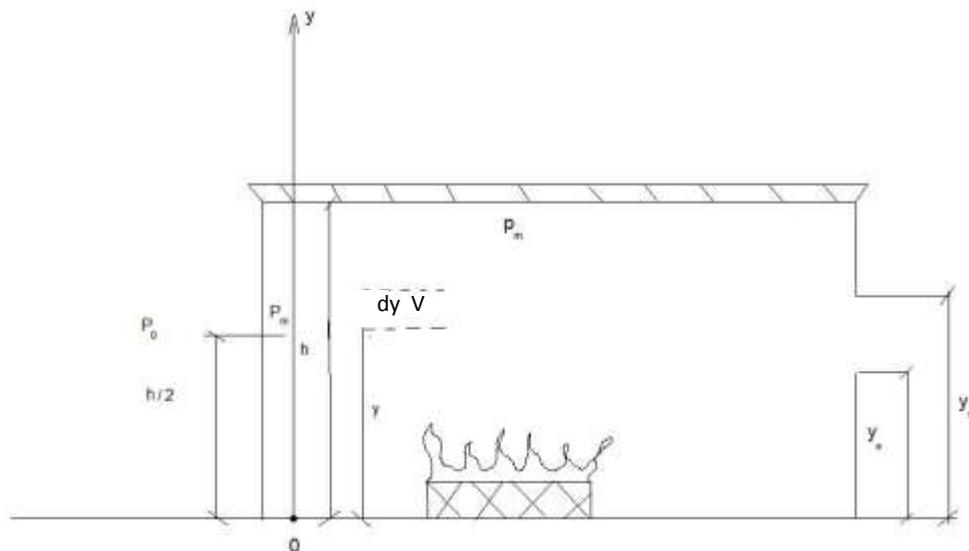


Рис.1. Схема помещения. O_y – координатная ось с началом отсчета на поверхности пола, h – высота помещения, м; y – координата, отсчитываемая от поверхности пола; dy – расстояние между двумя параллельными близко расположенными горизонтальными плоскостями; Y_n – координата нижнего края проема, Y_b – координата верхнего края проема; ρ_m – среднеобъемная плотность внутри помещения; P_0 – давление во внешней

среде на высоте равной половине высоты помещения; P_m – среднеобъемное давление в помещении.

Плотность наружного воздуха в области $0 \leq y \leq h$ имеет почти постоянное значение равно ρ_a . Изменение давления с высотой в наружном воздухе описывается дифференциальным уравнением гидростатики, которое имеет вид:

$$dP_{\text{нар}} = -g\rho_a dy \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м} \cdot \text{сек}^{-2}$; $P_{\text{нар}}$ – абсолютное давление во внешней атмосфере, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2} = \text{Па}$; которое на уровне половины высоты помещения $y = h/2$ обозначается как P_a .

Для того чтобы установить закон распределения давлений снаружи помещения, проинтегрируем уравнение (1). При этом правую часть уравнения проинтегрируем в пределах от $y = h/2$ до текущего значения координаты y , а левую часть соответственно в пределах от P_a до $P_{\text{нар}}$. В результате интегрирования получим следующее выражение:

$$P_{\text{нар}} - P_a = -g\rho_a(y - h/2) \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует

$$P_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h/2 - y) \quad (3)$$

Уравнение (3) является аналитическим выражением закона распределения наружных давлений вдоль вертикальной оси O_y .

На уровне пола, т.е. при $y = 0$ наружное давление равно:

$$P_{\text{нар}}(y = 0) = P_a + \rho_a g h / 2 \quad (4)$$

а наружное давление на уровне потолка

$$P_{\text{нар}}(y = h) = P_a - \rho_a g h / 2 \quad (5)$$

Закон распределения давления по вертикали внутри помещения устанавливается аналогичным образом, при этом делается допущение, что плотность внутри помещения в зоне $0 \leq y \leq h$ равна среднеобъемной величине ρ_m . Изменение давления с высотой изменяется согласно:

$$dP_{\text{вн}} = -g\rho_m dy \quad (6)$$

где $P_{\text{вн}}$ – давление внутри помещения $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды в помещении $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Правую часть уравнения (6) проинтегрируем в пределах от $y = h/2$ до текущего значения координаты y , а левую часть соответственно в пределах от $P_{\text{вн}}(h/2)$ до $P_{\text{вн}}$, где $P_{\text{вн}}(h/2)$ – давление внутри помещения на высоте $y = h/2$. В результате получим следующее аналитическое выражение закона распределения давлений внутри помещения:

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{вн}}(h/2) + \rho_m g (h/2 - y) \quad (7)$$

Так как давление внутри помещения распределено по линейному закону по вертикали, то среднеобъемное давление равно давлению на высоте $h/2$.

Действительно:

$$P_m = 1/V \int_{V_{\text{вн}}} P dv = 1/F_{\text{пола}} * h \int_0^h P_n dy * F_{\text{пола}} = P_{\text{вн}}(h/2)$$

Окончательно

$$P_{\text{вн}} = P_m + \rho_m g(h/2 - y) \quad (8)$$

2. Установленные законы распределения давлений внутри и снаружи помещения позволяют найти положение горизонтальной плоскости, на которой наружное давление равно давлению внутри помещения. Эту плоскость называют плоскостью равных давлений (ПРД). Положение этой плоскости определяется координатой y^* . Чтобы найти значения координаты ПРД, воспользуемся уравнением (3) и (8). Положив в этих уравнениях значения $y = y^*$ и приравняв правые части этих уравнений, получаем:

$$P_a + g\rho_2(h/2 - y^*) = P_m + g\rho_m(h/2 - y^*) \quad (9)$$

После преобразований уравнение (9) принимает вид для определения координаты ПРД:

$$y^* = h/2 - (P_m - P_a) / g(\rho_a - \rho_m) \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что положение ПРД зависит от параметров состояния газовой среды в помещении, которые изменяются в процессе пожара, а вместе с ними и положение ПРД, то есть изменяется координата y^* .

ПРД обладает следующим свойством. В зависимости от расположения проемов относительно ПРД возможны 3 разных режима газообмена через них.

Если проем целиком расположен выше ПРД, то через этот проем будут только выбрасываться газы из помещения. Это режим выталкивания. Если проем целиком расположен ниже ПРД, то через этот проем будет только поступать воздух из окружающей среды. Наконец, если ПРД проходит через проем, разделяя его на части, то в этом случае через верхнюю часть проема газы выталкиваются из помещения, а через нижнюю всасывается воздух снаружи. Это смешанный режим.

3. Разность между наружным и внутренним давлениями на разной высоте различна. Другими словами, перепад давления изменяется с высотой.

При условии, если область выше ПРД то, с помощью уравнений (3) и (8) определим разность давлений на высоте y :

$$\Delta P = P_{\text{вн}} - P_{\text{нар}} = (P_m - P_a) + g(\rho_m - \rho_a)(h/2 - y) \quad (11)$$

где ΔP – перепад давлений на высоте $y > y^*$.

Из (11) следует:

$$d(\Delta P) = -g(\rho_m - \rho_a)dy \quad (12)$$

Чтобы получить распределение перепадов давлений по высоте помещения над ПРД, проинтегрируем правую часть уравнения (12) по y в пределах от y^* до $y > y^*$, а левую часть в пределах от $\Delta P = 0$ (т.к. при $y = y^*$ перепад $\Delta P = 0$) до текущего значения ΔP

$$\Delta P = \int_{y^*}^y g(\rho_a - \rho_m) dy = g(\rho_a - \rho_m)(y - y^*) \quad (13)$$

В области, лежащей ниже ПРД, распределения перепадов давления определяется аналогичным образом. Перепад давлений в этой области определяется как разность наружного и внутреннего давлений, т.е.:

$$\delta_p = P_{\text{нар}} - P_{\text{вн}} \quad (14)$$

Где δ_p - перепад давлений в области $y < y^*$.

После математических операций, аналогичных использованным выше, получается выражение, определяющее распределения перепадов давлений по высоте помещения под ПРД (т.е. в области $y < y^*$):

$$\delta_p = -g(\rho_a - \rho_m)(y^* - y) \quad (15)$$

Знаки – означает, что перепад давлений δ_p действует противоположно перепаду ΔP .

Абсолютное значение перепадов давлений

$$|\delta_p| = g(\rho_a - \rho_m)(y^* - y) \quad (15a) \quad y^* > y$$

Если проем целиком расположен выше ПРД, то через все участки этого проема происходит истечение газа из помещения. Скорость газа зависит от перепада давлений

$$W_r = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m}} \quad (16)$$

Подстановка в это уравнение вместе с ΔP выражения (13) дает формулу, позволяющую рассчитать распределение скоростей по высоте проема:

$$W_r = \sqrt{2g(\rho_a - \rho_m)(y - y^*) / \rho_m} \quad (16a)$$

Для определения расхода газа через прямоугольный проем необходимо проинтегрировать выражение определяющее расход газа через полоску шириной « b » (ширина проема) и высотой dy

$$dG_r = b \cdot \rho_m \cdot dy \cdot W_r(y) \quad (17)$$

$$G_r = \int b \cdot \rho_m \cdot W_r(y) dy \quad (18)$$

y_n – координата нижнего края проема, y_b – координата верхнего края проема, $y_b > y_n > y^*$

После подстановки в интеграл (18) выражения, для скорости газа W_r из (16a), получается:

$$G_r = b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \int_{y_H}^{y_B} (y - y^*)^{1/2} dy \quad (19)$$

После выполнения интегрирования получается следующая формула для расчета расхода газа (наружу) через проем, когда $y_H > y^*$

$$G_r = 2/3b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} [(y_B - y^*)^{3/2} - (y_H - y^*)^{3/2}] \quad (20)$$

В том случае, когда плоскость равных давлений пересекает проем на две части, количество газов, выталкиваемых из проема, вычисляется таким же путем, интегрированием выражения (17). Однако, в этом случае интегрирование правой части уравнения (17) производится в пределах от y^* до y_B , т.е.

$$G_r = \rho_m W_r dy \quad (21)$$

Формула для расчета расхода уходящих газов через проем при смешанном режиме его работы получается после интегрирования (21) и имеет следующий вид:

$$G_r = 2/3b \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} (y_B - y^*)^{3/2} \quad (22)$$

Если проем целиком расположен ниже ПРД, то через все участки такого проема поступает воздух из окружающей среды, в помещение. Скорость втекающего воздуха зависит от перепада давлений:

$$W_B = \sqrt{2|\delta p| / \rho_a} = \sqrt{2g(\rho_a - \rho_m)(y^* - y) / \rho_a} \quad (23)$$

Подстановка вместо δp выражения (15а) позволяет рассчитать распределение скорости воздуха по высоте проема. Через малый участок в dy расход воздуха:

$$dG_r = b\rho_a W_B dy = b \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)(y^* - y)} dy \quad (24)$$

Через проем, который расположен ниже ПРД в помещение воздух поступает с расходом:

$$G_B = 2/3b \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} [(y^* - y_H)^{3/2} - (y^* - y_B)^{3/2}] \quad (25)$$

В случае, когда проем работает в смешанном режиме через нижнюю часть проема ($y < y^*$) в помещение воздух поступает с расходом:

$$G_B = 2/3b \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} (y^* - y_H)^{3/2} \quad (26)$$

При выводе выражений для определения расходов воздуха и газа, через проемы при пожаре не учитывались эффекты, связанные с вязкостью. Учет вязкости делается путем введения в правую часть всех формул множителя, называемого коэффициентом сопротивления.

Полные расходы уходящих газов и поступающего воздуха в случае, когда помещение имеет несколько разных (по размерам и расположению) проемов, определяется путем суммирования расходов через каждый взятый в отдельности проем.

При пожаре параметры состояния среды в помещении изменяются во времени. Следовательно, изменяются во времени расходы поступающего воздуха и уходящих газов. Кроме того, в процессе развития пожара могут вскрываться в определенные моменты времени те или иные проемы, которые в начале пожара были закрыты. Например, когда средняя температура достигает значения 300-400°C разрушается остекление оконных проемов.

На расход газа и воздуха через проемы оказывает влияние ветер. Особенно на течение через проемы, находящиеся на подветренной и наветренной сторонах. Дело в том, что из-за торможения воздуха на наветренной стороне здесь образуется область повышенного давления, в то время как с подветренной стороны давление понижается по сравнению со случаем отсутствия ветра.

Вдали от здания распределение давления вдоль вертикали описывается формулой (3)

$$P_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h/2 - y)$$

В непосредственной области от наружной наветренной стороны здания распределение давления имеет вид:

$$P'_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h/2 - y) + k_1\rho_a W_v^2 / 2 \quad (27)$$

где k_1 – первый аэродинамический коэффициент (эмпирическая величина); W_v – скорость ветра.

Распределение давлений около наружной подветренной стороны имеет следующий вид:

$$P''_{\text{нар}} = P_a + g\rho_a(h/2 - y) - k_2\rho_a W_v^2 / 2 \quad (28)$$

k_2 – второй аэродинамический коэффициент (эмпирическая величина).

Внутри помещения распределение давления описывает формула (7).

Координата ПРД меняется в процессе развития пожара, и она имеет разные координаты для подветренной и наветренной сторон здания.