



Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Академия гражданской защиты»  
Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий  
Донецкой Народной Республики

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ

## Лекция 2

### ГАЗО- И ТЕПЛООБМЕН НА ВНУТРЕННИХ ПОЖАРАХ. РЕЖИМЫ ПОЖАРВ

Преподаватель – Кипря Александр Владимирович,  
к.х.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин

## 1. Возникновение и развитие газообмена при пожаре

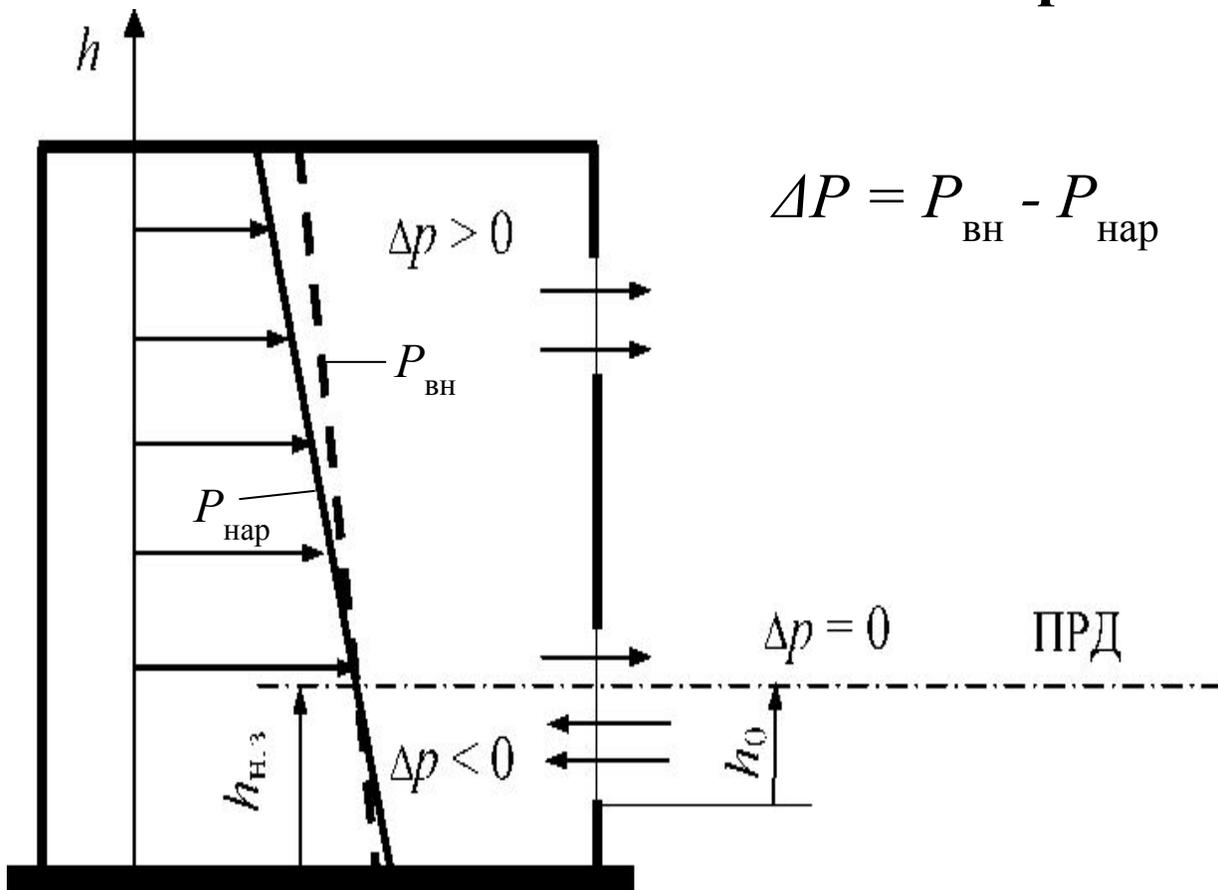


Рис. 1. Распределение давлений внутри и снаружи помещения: сплошная линия - эпюра давлений воздуха снаружи; пунктирная линия - эпюра давлений воздуха внутри помещения

Закон Паскаля:

$$p = p_0 - \rho gh,$$

где  $p$  - давление столба газа высотой  $h$ , Па;  
 $p_0$  - давление газа на базовой плоскости ( $h = 0$ ), Па

До пожара *распределение давлений воздуха по высоте внутри и снаружи помещения, как правило, складывается так, что в верхней части давление больше, а в нижней части - меньше атмосферного.*

*На некоторой высоте давление воздуха внутри равно давлению снаружи. На этом уровне располагается условная горизонтальная плоскость, которая называется **плоскостью равных давлений (ПРД)**, или **нейтральной зоной**.*

*Через все отверстия, расположенные выше ПРД, воздух вытекает из помещения, ниже ПРД - поступает в помещение*

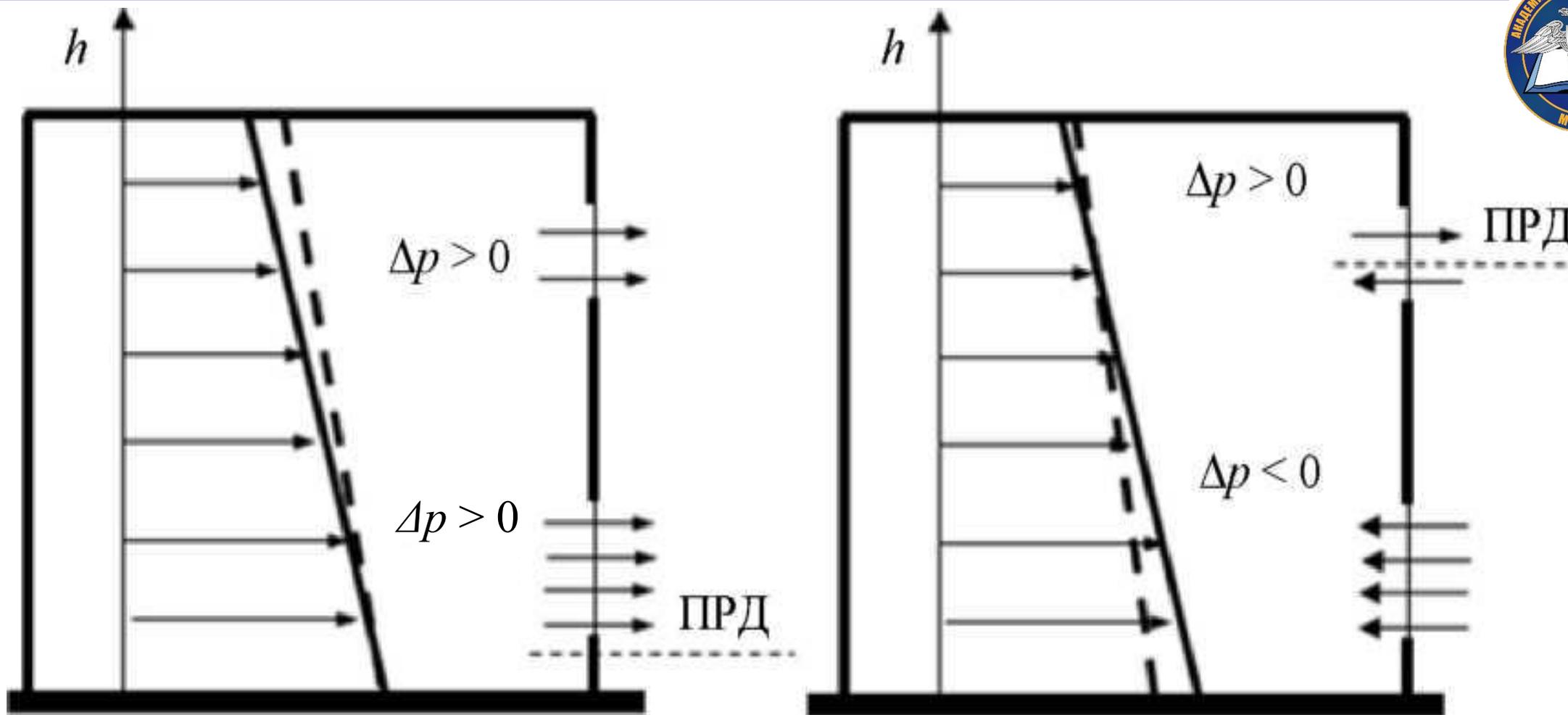


Рис.2. Изменение положения ПРД при появлении и развитии очага горения

# Возникновение и развитие газообмена при пожаре

## Основные параметры газообмена:

- *требуемый расход воздуха*  $G_B^0$ , кг/с – расход воздуха, необходимый для полного сгорания материала с заданной массовой скоростью;
- *фактический расход воздуха*  $G_B^\Phi$ , кг/с – масса воздуха, поступающего в помещение при пожаре в единицу времени;
- *коэффициент избытка воздуха*:

$$\alpha = \frac{G_B^\Phi}{G_B^0}$$

Требуемый расход воздуха находят по формуле:

$$G_B^0 = v_M^{\text{уд}} S_{\text{П}} V_B^0 \rho_B$$

где  $v_M^{\text{уд}}$  – удельная массовая скорость выгорания,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;

$S_{\text{П}}$  – площадь пожара,  $\text{м}^2$ ;

$V_B^0$  – теоретический объем воздуха, необходимый для горения,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\rho_B$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$

## Оценка фактического расхода воздуха



Рис. 3. Схема распределения давлений и газовых потоков при пожаре в помещении: стрелками показано направление движения газовых потоков; сплошная линия - эпюра давлений воздуха снаружи; пунктирная линия - эпюра давлений газовой среды внутри помещения

# Возникновение и развитие газообмена при пожаре

• Разность давлений газа (внутри помещения) и воздуха (снаружи) на расстоянии  $h$  будет равна:

выше ПРД  $\Delta p = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})gh > 0;$

ниже ПРД  $\Delta p = (\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{в}})gh < 0.$

$$\Delta P = \frac{\rho w^2}{2}$$

Скорость газа и скорость воздуха:

$$w_{\text{Г}} = \sqrt{\frac{2gh(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})}{\rho_{\text{Г}}}}$$

$$w_{\text{В}} = \sqrt{\frac{2gh(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})}{\rho_{\text{В}}}}$$

## Массовые расходы газов и воздуха

$$G_{\text{Г}} = \frac{2}{3} \mu \rho_{\text{Г}} B \sqrt{\frac{2g(H - h_0)^3 (\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{Г}})}{\rho_{\text{Г}}}}$$

$$G_{\text{В}} = \frac{2}{3} \mu \rho_{\text{В}} B \sqrt{\frac{2gh_0^3 (\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{Г}})}{\rho_{\text{В}}}}$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления проема;

$B$  – ширина проема, м;

$H$  – высота проема, м;

$h_0$  – высота ПРД относительно базовой плоскости, м.

При достижении стационарного режима газообмена:

$$G_{\text{Г}} = G_{\text{В}}$$

$$h_0 = \frac{H}{1 + \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\text{Г}}}}}$$



$$G_B = \frac{2}{3} \mu S_{\text{пр}} \sqrt{H} \sqrt{\frac{2g(\rho_B - \rho_G)\rho_B\rho_G}{(\sqrt[3]{\rho_B} + \sqrt[3]{\rho_G})^3}}$$

где  $S_{\text{пр}}$  - площадь проема,  $S_{\text{пр}} = BH$

Коэффициент сопротивления проема изменяется в пределах 0,6 – 0,7. Можно считать, что  $\mu = 0,65$ .

Используя уравнение Менделеева – Клапейрона, плотность газовой среды можно представить как

$$\rho_G = \rho_B \frac{T_0}{T_{\text{п}}},$$

где  $T_0$  – температура воздуха, К;

$T_{\text{п}}$  – температура пожара, К.

Плотность воздуха обычно принимается равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>, а  $T_0 = 293\text{K}$  (т.е. 20°C). Тогда

$$\rho_G \approx \frac{352}{T_{\text{п}}}$$
$$G_B \approx 0,61 S_{\text{пр}} \sqrt{H}$$

Произведение  $S_{\text{пр}} \sqrt{H}$  называется *параметром проемности помещения*.

# Тепловой баланс помещения при пожаре

## 2. Тепловой баланс помещения при пожаре

На пожаре источником тепла является зона горения. Интенсивность тепловыделения (теплота пожара) прямо пропорциональна массовой скорости выгорания, что следует из формулы

$$q_{\text{п}} = \beta v_{\text{м}}^{\text{абс}} Q_{\text{н}}$$

$q_{\text{п}}$  – теплота пожара – количество тепла, выделяющееся в зоне горения в единицу времени, кВт;

$\beta$  – коэффициент полноты сгорания (0,75 – 0,9);

$v_{\text{м}}^{\text{абс}}$  – абсолютная массовая скорость выгорания, кг/с;

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

Если бы тепло, выделяющееся в зоне горения, расходовалось только на нагрев газовой среды внутри помещения, то ее максимальная температура постепенно достигала бы температуры пламени.

Максимальная температура диффузионного пламени газов составляет около 1350°C, большинства жидкостей - 1250 °С, твердых материалов - 1150 °С.

Однако часть тепла, выделяющегося в зоне горения, поглощают строительные конструкции, часть теряется в результате излучения через открытые проемы, затрачивается на нагрев горючих материалов, уходит из помещения вместе с продуктами горения через проемы.

Поэтому температура внутреннего пожара всегда ниже температуры пламени.

## Тепловой баланс помещения при пожаре

В общем виде тепловой баланс внутреннего пожара может быть представлен уравнением:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{ср}} + q_{\text{уд}} + q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}}$$

где  $q_{\text{п}}$  – теплота пожара (интенсивность выделения тепла на пожаре);

$q_{\text{ср}}$  – интенсивность накопления тепла газовой средой в помещении;

$q_{\text{уд}}$  – интенсивность удаления тепла из помещения нагретыми газами;

$q_{\text{м}}$  – интенсивность поглощения тепла горючими материалами во время их нагрева до воспламенения;

$q_{\text{к}}$  – интенсивность поглощения тепла ограждающими конструкциями;

$q_{\text{л}}$  – интенсивность излучения тепла за пределы помещения через проемы.

Представим сумму  $(q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}})$  как долю потерь ( $m$ ) от  $q_{\text{п}}$ . Тогда уравнение теплового баланса можно переписать в виде:

$$q_{\text{ср}} = q_{\text{п}}(1 - m) - q_{\text{уд}}$$

## Тепловой баланс помещения при пожаре



Если  $q_{\Pi}(1 - m) > q_{уд}$ , то  $q_{ср} > 0$  – интенсивность аккумуляирования тепла газовой средой выше интенсивности потерь -  $T_{\Pi}$  повышается.

Если  $q_{\Pi}(1 - m) = q_{уд}$ , то  $q_{ср} = 0$  – система находится в динамическом равновесии, пожар протекает при установившемся (стационарном) тепло- и газообмене –  $T_{\Pi} = \text{const}$ .

Если  $q_{\Pi}(1 - m) < q_{уд}$ , то  $q_{ср} < 0$  – интенсивность накопления тепла газовой средой меньше интенсивности потерь -  $T_{\Pi}$  уменьшается.



## 4. Режимы внутренних пожаров

- Экспериментально установлено, что при стационарном газообмене  $v_M$  зависит от  $S_{пр} \sqrt{H}$

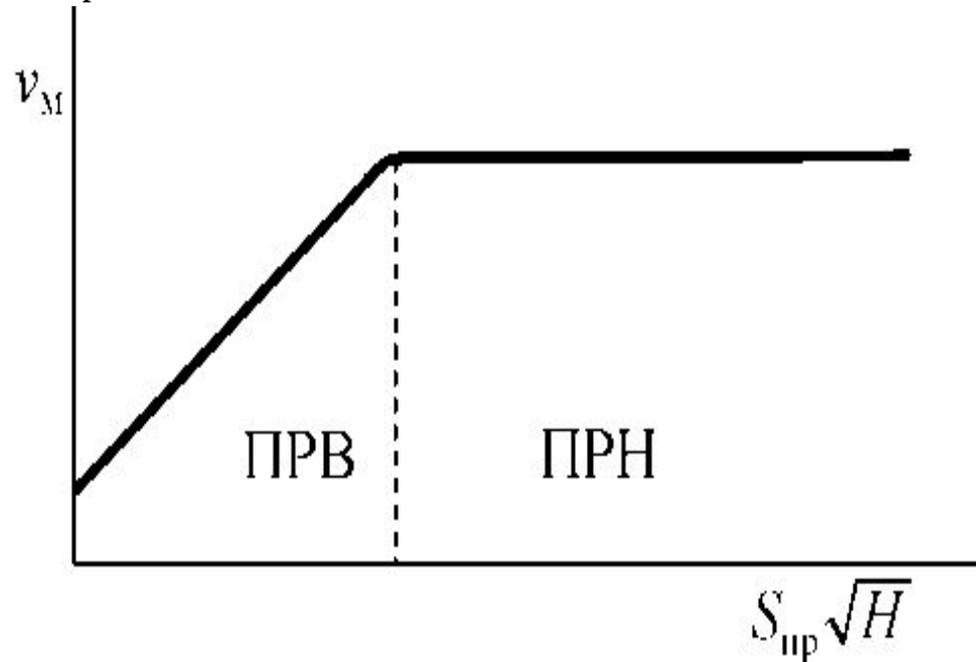


Рис. 4. Вид зависимости массовой скорости выгорания от проемности помещения

ПРН - режим пожара, при котором массовая скорость выгорания определяется характеристиками пожарной нагрузки и не зависит от изменения притока воздуха в помещение.

ПРВ - режим пожара, при котором расход воздуха, поступающего в помещение, лимитирует массовую скорость выгорания.

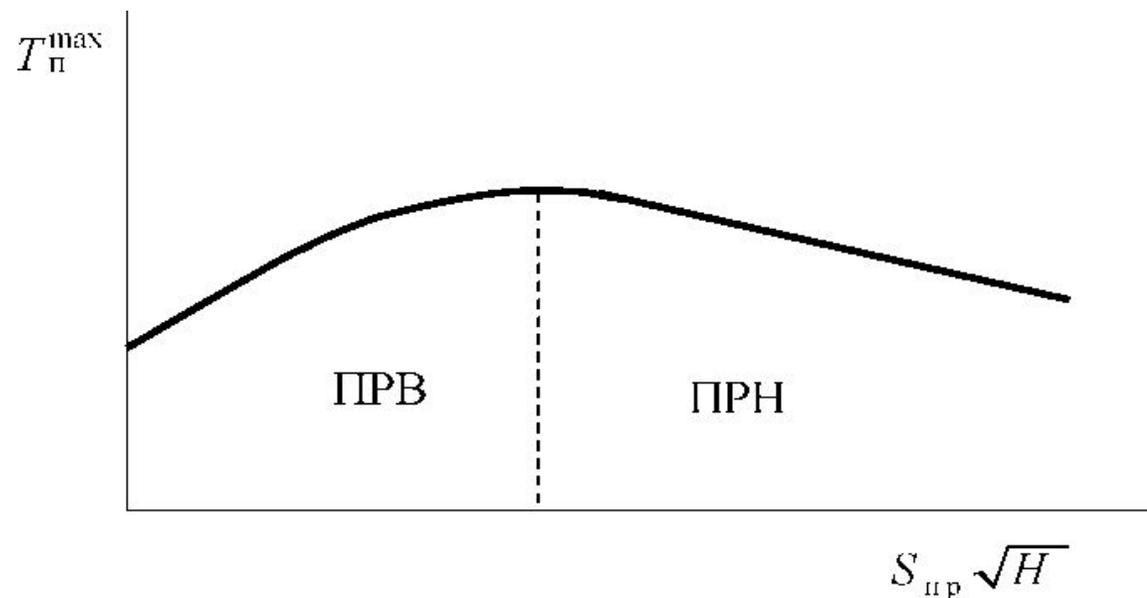


Рис. 5. Вид зависимости максимальной температуры пожара от проемности помещения

При горении штабеля древесины режим пожара можно определить по параметру  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{\rho_{\text{в}} \sqrt{g} S_{\text{пр}} \sqrt{H_{\text{пр}}}}{S_{\text{пг}}}$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения;

$S_{\text{пр}}$  – площадь проема, м<sup>2</sup>;

$H$  – высота проема, м;

$S_{\text{пг}}$  – площадь поверхности горения, м<sup>2</sup>.

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.