

Лекция по теме № 1

Параметры пожаров. Открытые и внутренние пожары

Учебные вопросы:

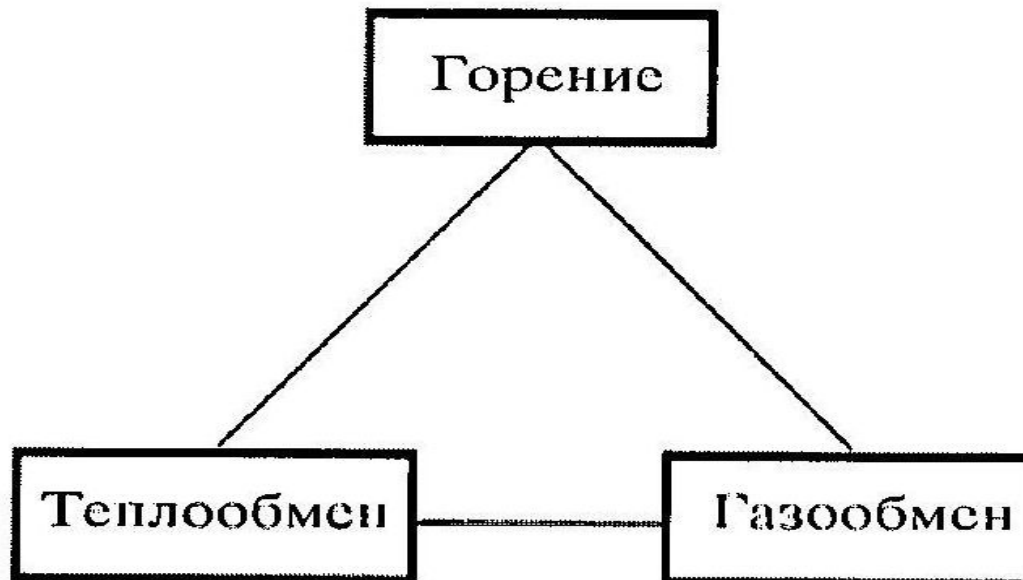
1. Параметры пожаров
2. Классификация пожаров
3. Открытые пожары: газовых фонтанов, резервуаров, твёрдых горючих веществ
4. Основные процессы и параметры внутренних пожаров.

Литература

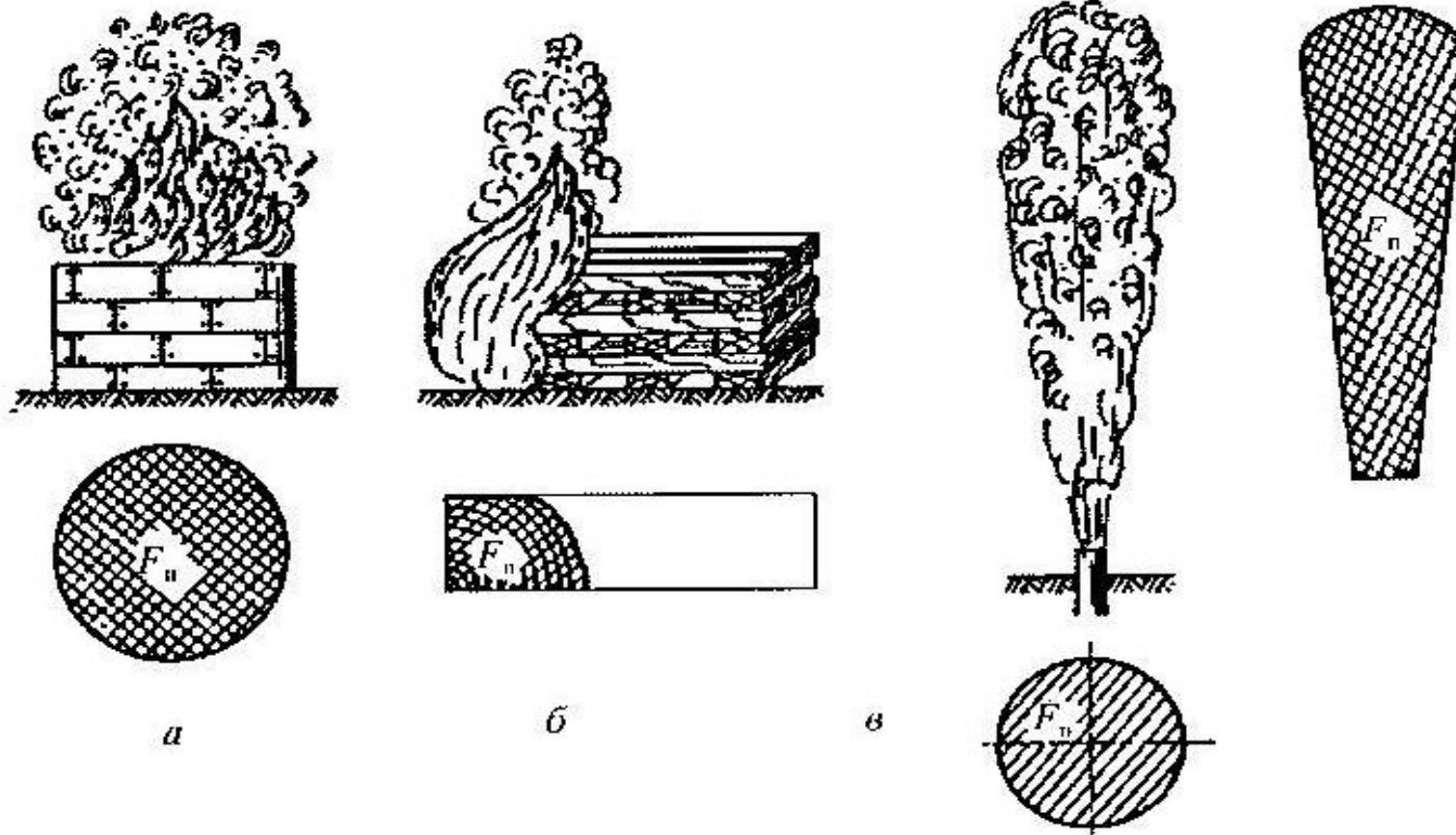
1. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Учебное пособие. Марков В.Ф., Маскаева Л.Н. и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2009 г., с. 97-109, 154-237
2. ГОСТ 12.1.044-89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

1. Основные параметры пожаров

Пожар представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов **горения, теплообмена и газообмена**, которые служат причиной вторичных явлений: задымления, объемной вспышки, взрыва, обрушения и т.д.



1. Площадь пожара, $F_{п}$ – площадь проекции зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость.



Площадь пожара: а – при горении жидкости в резервуаре; б - при горении штабеля пиломатериалов; в – при горении газонефтяного фонтана.

2. Продолжительность пожара, $\tau_{\text{п}}$, мин. – время с момента **его возникновения до полного прекращения** горения.

3. Температура пожара, $t_{\text{п}}$, °C или K.

Для **открытых** пожаров за $t_{\text{п}}$ принимают **температуру пламени** (от 1200 до 2900°C).

Для **внутренних** пожаров за $t_{\text{п}}$ принимают **среднеобъемную температуру газовой среды** в помещении.
Она редко превышает 1000°C.

4. Величина пожарной нагрузки, $P_{п.н.}$, кг/м²

– это масса всех горючих и трудногорючих материалов, приходящихся на 1 м² площади их размещения:

$$P_{пн} = \frac{\sum M_i}{F}$$

где $\sum M_i$ - общая масса всех горючих и трудногорючих материалов, кг;

F – площадь пола помещения или открытой площадки, м².

Пожарную нагрузку разделяют на **постоянную и временную.**

5. Площадь поверхности горения, $F_{\text{пг}}$, м^2 – реальная площадь поверхности горючего вещества, участвующего в горении.

Величина $F_{\text{пг}}$ определяет **интенсивность выделения тепла при пожаре**

6. Коэффициентом поверхности горения называют отношение площади поверхности горения, $F_{\text{пг}}$, к площади пожара, $F_{\text{п}}$:

$$K_{\text{пг}} = \frac{F_{\text{пг}}}{F_{\text{п}}}$$

7. Линейная скорость распространения пожара, $v_{\text{л}}$, м/с – это скорость распространения фронта пламени по поверхности горючего материала, она зависит:

- от природы, вида и геометрии горючего материала;
- исходной температуры;
- интенсивности газообмена;
- метеорологических условий.

8. Массовой скоростью выгорания, $v_{\text{м}}$, кг/с, называется масса пожарной нагрузки, выгоревшей в единицу времени

Различают **приведенную массовую скорость выгорания, v'** , т. е. на 1 м^2 площади пожара:

$$v'_m = \frac{V_m}{F_p}$$

и **удельную массовую скорость выгорания $\bar{v}$**

$\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $\text{кг}/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$ - массу выгоревшей пожарной нагрузки в единицу времени на единицу площади поверхности горения:

$$\bar{V}_m = \frac{V_m}{F_{\text{пг}}}$$

Объемной скоростью выгорания, $v_{об}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

называется объем пожарной нагрузки, выгорающий в единицу времени с единицы площади.

Горючие вещества и материалы
*различаются по своей теплотворной
способности.*

9. Это учитывает показатель *теплого
эквивалента пожарной нагрузки, q , МДж/м²:*

$$q = \frac{\sum_i M_i \cdot Q_i}{F}$$

где Q_i – низшая теплота сгорания i -го горючего
вещества, кДж/кг.

10. Интенсивность пожара, q_n , кВт – показывает, какое количество энергии в виде теплоты выделяется при пожаре в единицу времени:

$$q_n = \beta \times v_m \times Q_c^H$$

где β – коэффициент полноты сгорания;
 v_m – массовая скорость выгорания, кг/с;
 Q_c^H – низшая теплота сгорания материала, кДж/кг.

11. Удельная величина интенсивности пожара - это интенсивность выделения теплоты с единицы площади пожара, кВт/м²:

$$q_n' = \frac{q_n}{F_n}$$

12. Интенсивность или плотность задымления, x , г/м³ – характеризует массовое содержание частиц дыма, находящихся в единице объема газовой среды и связанное с этим ухудшение видимости и степени токсичности атмосферы в зоне пожара.

Классификация плотности дыма

Плотность дыма	Концентрация частиц дыма, г/м ³	Толщина слоя дыма, экранирующая свет эталонной лампы силой 21 Кд, м
Высокая	более 1.5	менее 3
Средняя	0.6 – 1.5	3 - 6
Низкая	0.1 – 0.6	6 - 12

Все параметры пожара изменяются во времени и взаимосвязаны.

Основной фактор, оказывающий влияние на все параметры пожара, - ***количество горючих материалов на объекте.***

Параметр, определяющий ***развитие пожара, - интенсивность пожара.***

Опасные факторы пожара

- температура среды – 70°C ;
- уровень теплового излучения – 500 Вт/м^2 ;
- содержание CO – 0.1 об.%;
- содержание CO₂ – 6.0 об.%;
- концентрация O₂ – менее 17 об.%;
- показатель ослабления света дымом – 2.4.

2. Классификация пожаров

По характеру тепло- и газообмена пожары делят на два вида: открытые и внутренние.

Открытые пожары – те, в которых присутствует тепло- и газообмен *только зоны горения с окружающей средой.*

Внутренние пожары – те, что протекают в *помещениях и внутри технологических агрегатов.*

Для них характерны процессы тепло- и газообмена *зоны горения с ограждающими конструкциями и помещения с внешней средой.*

По агрегатному состоянию
горючих веществ различают пожары,
связанные с горением **газов,
жидкостей, твердых веществ.**

По начальной стадии пожара и его
причине различают
самовоспламенение
(самовозгорание) горючих веществ и
вынужденное (принудительное)
зажигание.

По степени сложности и опасности пожара пожару присваивается номер или ранг (от 1 до 5) – условное цифровое выражение, определяющее количество сил и средств, привлекаемых к его тушению.

По виду горючего материала и рекомендуемым средствам его тушения в России и Великобритании все пожары разделены на ***классы и подклассы***.

Класс А – пожары твердых материалов.

В **подкласс A_1** входят пожары тлеющих материалов (древесины, текстиля, бумаги),
в **подкласс A_2** – нетлеющих материалов
(резина, полимеры)

Класс В – пожары огнеопасных жидкостей.

В **подкласс B_1** выделены пожары,
связанные с горением полярных жидкостей
(спиртов, эфиров и др.),

в **подкласс B_2** – с горением неполярных жидкостей (бензина, мазута, масел и др.).

Класс С – пожары, связанные с горением газов (метана, водорода и др.).

Класс Д – пожары, связанные с горением металлов.

Подкласс D_1 соответствует пожарам, связанным с горением Al, Mg,

подкласс D_2 – с горением щелочных металлов,

подкласс D_3 – с горением металлосодержащих веществ (металлоорганики, гидридов и др.)

Класс Е – пожары на электроустановках и электрооборудовании.

3.Открытые пожары: газовых фонтанов, резервуаров, твёрдых горючих веществ

Особенности:

- Газообмен не ограничен конструктивными элементами
- Основной механизм теплопереноса — излучение
- Теплообмен с неограниченным окружающим пространством
- Сильная зависимость скорости распространения пламени от метеорологических условий

Открытые пожары газовых фонтанов

Газовые фонтаны

Фонтаны природных углеводородов
условно делят на

газовые, газонефтяные и нефтяные.

К **газовым** относят фонтаны, массовое
содержание горючих газов в которых
составляет не менее 95% об.,

газонефтяным – от 50 до 95% об.,

нефтяным – менее 50% об.

**Для пожаров
газовых фонтанов
характерно
турбулентное диффузионное
пламя,
т.к. истечение газа из устья
скважины происходит при $Re > 2300$**

Критерий Рейнольдса

(характеризует переход ламинарного течения в турбулентное):

$$Re = \frac{v \cdot r \cdot \rho}{\eta}$$

v – скорость течения;

r – радиус трубы;

ρ – плотность;

η – вязкость.

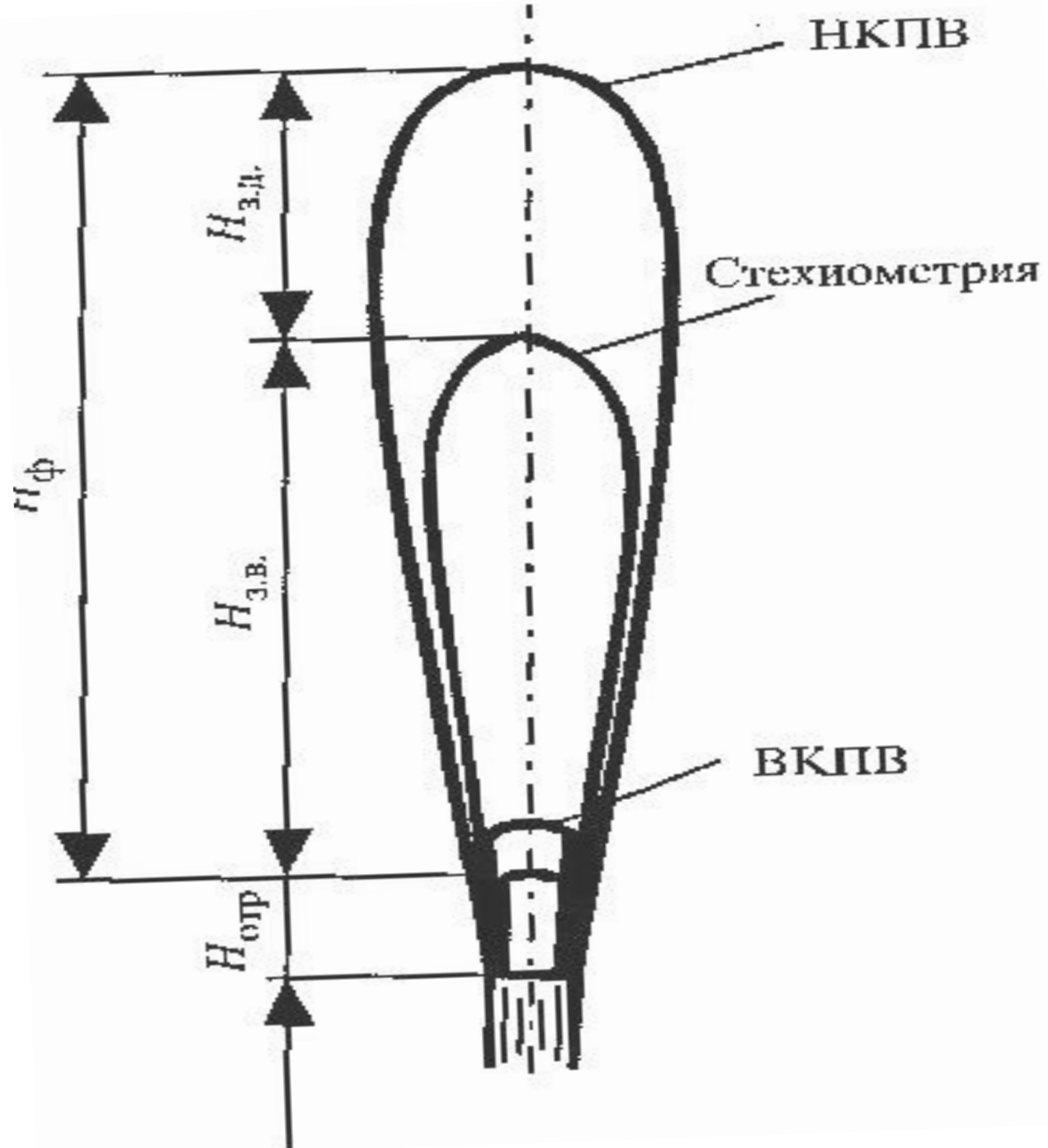
Для **турбулентного диффузионного
пламени** характерны:

- неполнота сгорания,
- размытый фронт, образующийся по объему,
где смесь имеет стехиометрический состав.

**Факел газового фонтана имеет
3 области концентраций,
соответствующих**

- НКПВ,
- смеси стехиометрического состава,
- ВКПВ.

Для
углеводород
ных газов
температура
пламени
 $1350-1800^{\circ}\text{C}$.



Для расчета Нф (м) используют эмпирическую формулу:

$$H_{\phi} = 20 \times \sqrt{V_{\Gamma}}$$

где V_{Γ} - дебит газа, млн. м³/сут.

Максимальный диаметр верхней части факела, D_{ϕ} (м) рассчитывают с учетом высоты факела:

$$D_{\phi} = (0.10 \div 0.15) H_{\phi}$$

Факел фонтана служит источником ***теплового излучения,***
его интенсивность
определяют по формуле:

$$q_n = \beta \times V_{\Gamma} \times Q_c^H$$

где V_{Γ} - дебит газа, м³/с.

Облученность объектов от факела газового фонтана в определяется по формуле:

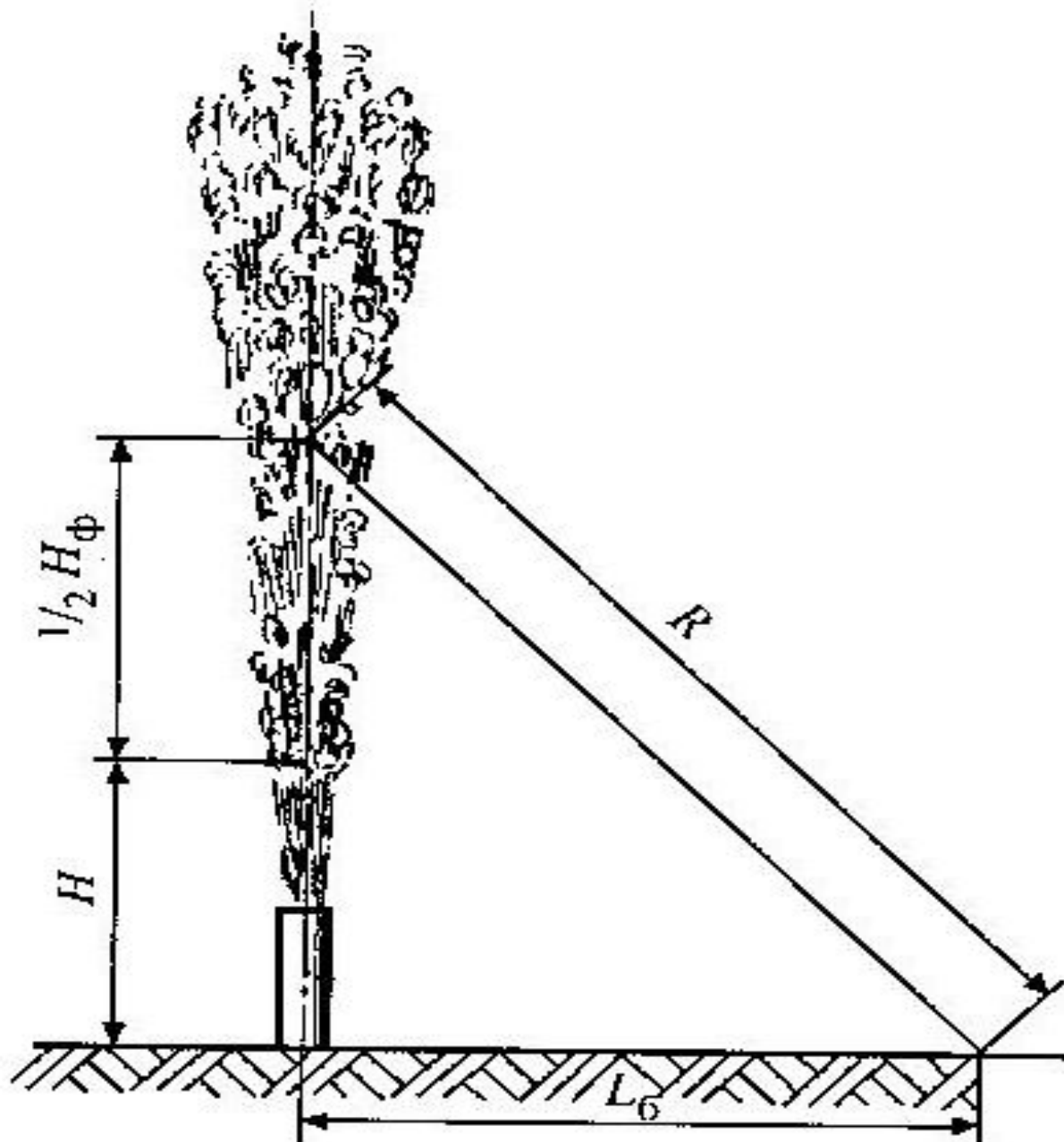
$$E = \frac{\eta_{\text{л}} \cdot q_{\text{п}}}{4\pi \cdot R^2} \quad \text{Вт/м}^2$$

где $\eta_{\text{л}}$ – доля теплоты газового фонтана, рассеиваемая в окружающую среду **излучением**;
 R – расстояние от центра факела до точки измерения на земле

Величина R:

$$R = \left(\frac{\eta_{\text{л}} \cdot q_{\text{п}}}{4\pi \cdot E_{\text{н}}} \right)^{1/2}$$

$E_{\text{н}} = 1.6 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$
(уровень
облученности
для расчета
**безопасного
расстояния**)



Открытые пожары резервуаров

Параметры пожара резервуаров в значительной степени **определяются диффузионными процессами (интенсивностью поступления в зону горения O_2)**.

При **распространении пламени по поверхности жидкости** проявляется **эффект Марангони** – перемещение поверхностных слоёв в сторону области **с низким поверхностным натяжением** – т.е. в сторону пламени.

В технических резервуарах горение жидкостей
турбулентное.

Высота пламени прямо пропорциональна
его ***диаметру***:

для резервуаров с $D = 2 \div 23$ м пламя имеет
высоту

1.5 D (для бензола);

1.0 D (для дизтоплива);

0.8 D (для этанола).

Относительная высота пламени (H/D)
с увеличением D снижается.

Массовая скорость выгорания жидкости

$$V_M = \frac{\rho \cdot V_{\text{л}} \cdot 10^{-3}}{60} \quad \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

$V_{\text{л}}$ – линейная скорость выгорания, мм/мин .

Скорость выгорания **не является физико-химической константой**, она зависит не только от свойств жидкости, но и от условий **тепло-массообмена**, **площади зеркала в резервуаре**.

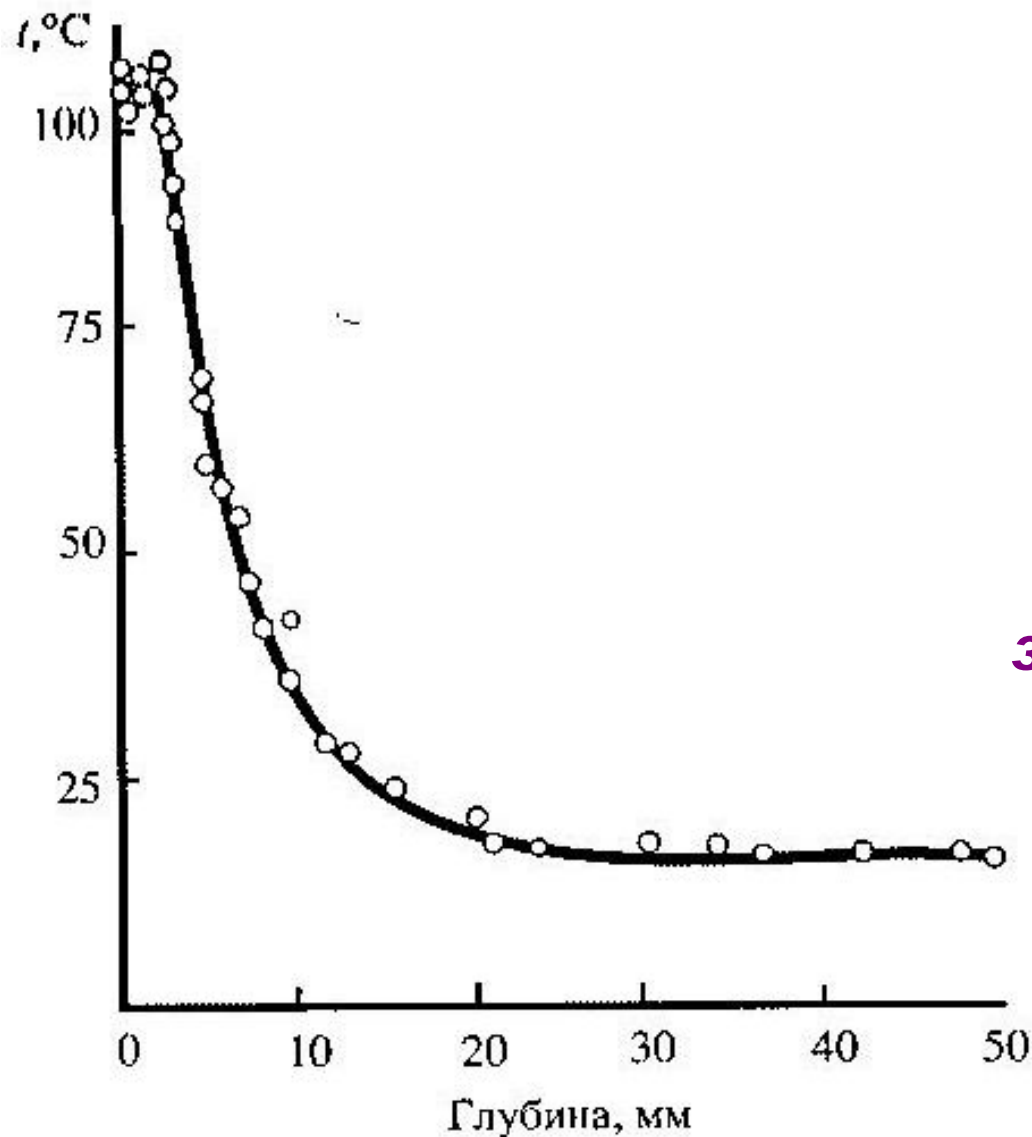
Зависимость линейной скорости выгорания различных жидкостей от диаметра резервуара



При увеличении диаметра сосуда до 0,1 м скорость горения большинства жидкостей снижается в 5-10 раз.

Увеличение диаметра (до 1 метра) приводит к росту скорости, а начиная с 1 метра – к ее стабилизации на уровне 1,5-5,0 мм/мин.

Температура горения и гомотермальная зона



**Во время горения
жидкости
устанавливается
постоянная
температура
поверхностного слоя,
зависящая от природы
жидкости.**

Распределение температуры по глубине *n*-бутанола во время его стабильного горения (диаметр резервуара 36 мм).

При горении смеси сложного состава (бензин, керосин и т.п.), **распределения температуры по глубине жидкости не происходит**, а в приповерхностном слое образуется **гомотермальная зона – слой жидкости, T которого постоянна и равна T поверхности.**

В процессе горения гомотермальная зона **увеличивается со скоростью, превышающей скорость выгорания жидкости.**

Если такая зона с температурой выше 100°C достигнет придонной области резервуара, где ***присутствует вода***, может произойти её вскипание и взрывной выброс горячей жидкости.

Случайное диспергирование горючей жидкости в воздухе (образование аэрозолей) может стать причиной пожара или взрыва.

Открытые пожары твердых горючих веществ

К открытым пожарам, связанным с горением **твердых горючих материалов**, относятся:

- пожары на складах лесоматериалов,
 - лесные пожары,
 - пожары торфополей,
- пожары хлебных массивов,
 - степные пожары,
 - огненные штормы.

Пожары на складах лесоматериалов

Особенности:

- 1) высокая скорость распространения пламени (4-10 м/мин.);
- 2) формирование мощных конвективных потоков, слабо зависящих от метеоусловий.

На скорость распространения влияют:

- 1) вид и геометрическая форма горючего вещества;
- 2) влажность материала.

Лесные пожары

Особенности:

- 1) неравномерность скорости движения отдельных участков фронта пламени из-за **разнообразия горючих материалов;**
- 2) влияние на скорость распространения пламени **влажности горючих материалов и воздуха, а также метеорологических условий.**

Лесные горючие материалы делят на 3 класса:

- 1) **проводники** горения (сухая трава, мхи, торф);
- 2) **поддерживающие** горение (валежник, кустарник)
- 3) **задерживающие** горение (брусника, черника, багульник)

Лесные пожары делят на:

- а) низовые и верховые;**
- б) беглые и устойчивые.**

Скорость распространения пламени:

- а) **низового** устойчивого пожара – менее 300 м/ч;**
- б) **низового** беглого – 300 – 600 м/ч;**
- в) **верхового** устойчивого – 600 – 5000 м/ч.**
- г) **верхового** беглого – 5000 – 40000 м/ч.**

Торфяные пожары

**становятся возможными при уменьшении влажности торфа от 1200% до 500%;
могут возникнуть практически без доступа O_2 .**

Особенности:

- а) механизм горения торфа – гетерогенный беспламенный;
- б) процесс горения приводит к образованию пещер глубиной до 1,5 м;
- в) скорость распространения подземных торфяных пожаров – менее 10 м/сутки.

Степные пожары

имеют особенности:

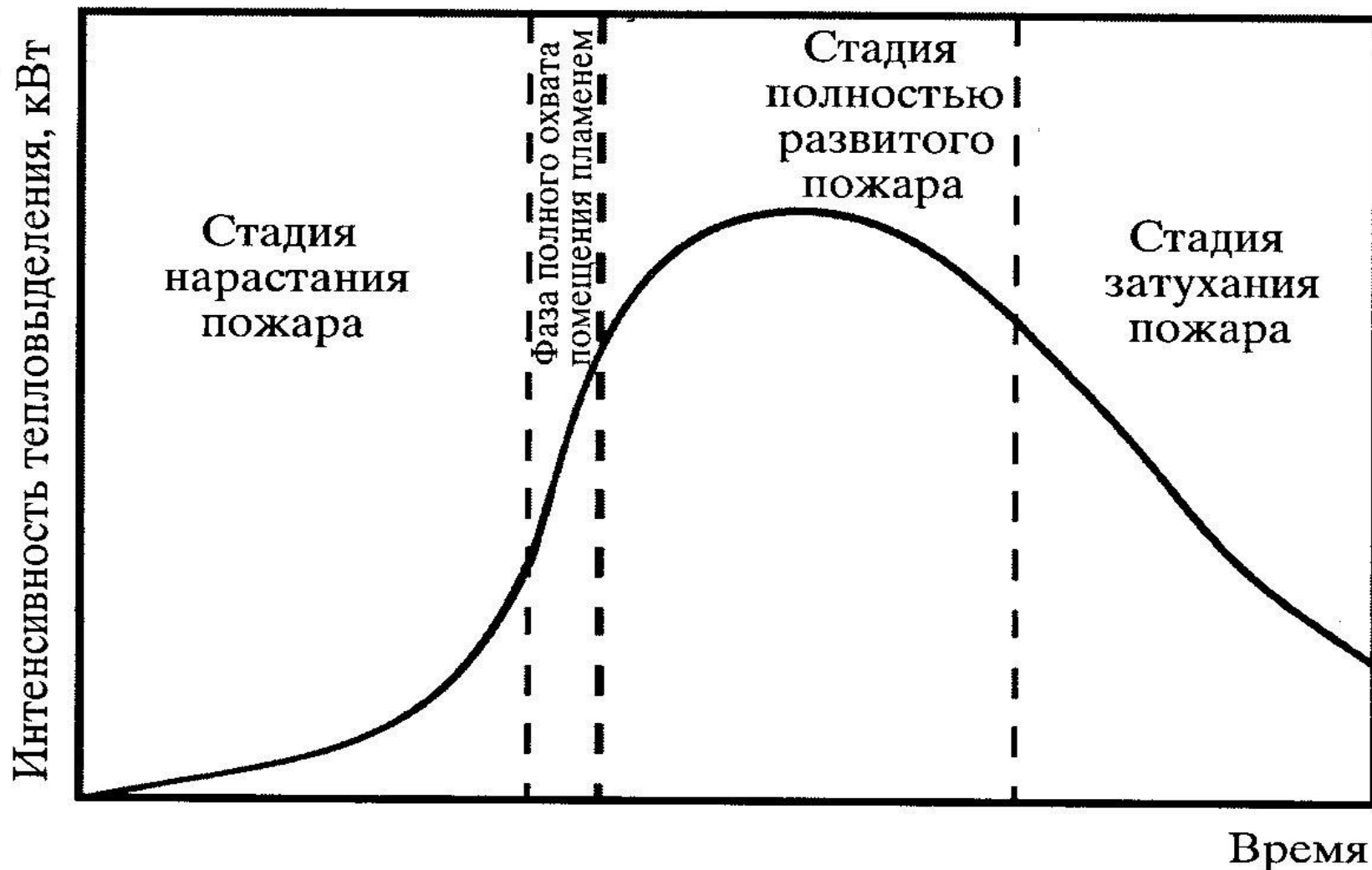
- а) степная растительность является легковоспламеняющимся горючим материалом;
- б) высокая скорость распространения пламени (до 700 м/мин) и существенное влияние на неё метеорологических условий.
- в) незначительная ширина фронта пламени.

Огненный шторм

- возникает в результате слияния многочисленных небольших пожаров в насыщенной горючими материалами среде;
- создает сильную ветровую нагрузку – 20-50 м/с;
- образует конвективную колонну высотой до 10 км с большой подъёмной силой.

4. Основные процессы и параметры внутренних пожаров

Стадии и фазы развития внутреннего пожара



Процесс протекания пожара **делят на 3 стадии:**

стадия нарастания пожара

(включает 2 фазы – **возгорания**
и **непосредственного начала** пожара);

•стадия полностью развитого пожара

(включает 3 фазы-
полного охвата помещения пламенем,
максимальной интенсивности пожара
и **стационарного горения**);

•стадия затухания

(состоит из 2 фаз – **снижения интенсивности**
горения и **догорания**).

Факторы, влияющие на время наступления объемной вспышки:

- расположение и размеры источника зажигания;**
- высота очага пожара;**
- плотность размещения пожарной нагрузки;**
- физические свойства материалов облицовки стен и потолка (температуропроводность, теплоёмкость, плотность)**

$$\lambda, c_p, \rho$$

Время наступления полного охвата помещения пламенем в зависимости от плотности облицовочного материала стен (сравнительные данные)

Материал стен	Плотность массы, кг/м ³	Время до наступления объемной вспышки, мин
Кирпич	1600	23.5
Легкий бетон марки А	1360	23.0
Легкий бетон марки Б	800	17.0
Асбестовое покрытие	320	8.0
Древесно-волокнистая плита	~300	6.7

Режим *полностью развитого пожара* определяют параметры:

- а) скорость выгорания пожарной нагрузки;**
- б) площадь поверхности горючих материалов;**
- в) температурный режим и интенсивность тепловыделения;**
- г) параметры газообмена.**

Скорость выгорания пожарной нагрузки

определяется размерами и формами
вентиляционных проемов:

$$V_M = K \cdot F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{H}$$

где $F_{\text{пр}}$ и H – площадь и высота
вентиляционного проема,

K – константа, характеризующая **массовую
скорость выгорания данного горючего
материала при проемности помещения,
равной единице, кг/(м^{5/2}•с),
(для древесины $K=0.09$ кг/(м^{5/2}•с))**

Различают 2 основных режима пожара:

- регулируемого вентиляцией;
- регулируемого пожарной нагрузкой.

Первый режим считается более опасным

Если выполняется условие:

$$0.235 \geq \frac{\rho_v \cdot F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{g \cdot H}}{F_{\text{пов.гм}}}$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

F – площадь поверхности горючих материалов

Пожар регулируется вентиляцией

Если выполняется условие:

$$\frac{\rho_v \cdot F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{g \cdot H}}{F_{\text{пов.гм}}} \geq 0.290$$

$F_{\text{пов.гм}}$

пов.гм

Пожар регулируется пожарной нагрузкой

Если отношение *площади поверхности стен и потолка (без учета площади вентиляционных проемов)* **к параметру вентиляции**

$$F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{H}$$

меньше 8 – 10, то пожар регулируется *пожарной нагрузкой*.

Температурный режим и интенсивность тепловыделения

Температурный режим внутреннего пожара – это ***изменение среднеобъемной температуры*** во времени.

Среднеобъемную температуру пожара рассчитывают по ***уравнению теплового баланса*** внутреннего пожара

Уравнение теплового баланса внутреннего пожара:

$$q_{\text{п}} = q_{\text{дг}} + q_{\text{изл}} + q_{\text{ст}} + q_{\text{гм}} - q_{\text{в}},$$

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

$q_{\text{дг}}$ - интенсивность удаления тепла из помещения вместе с продуктами горения (дымовыми газами);

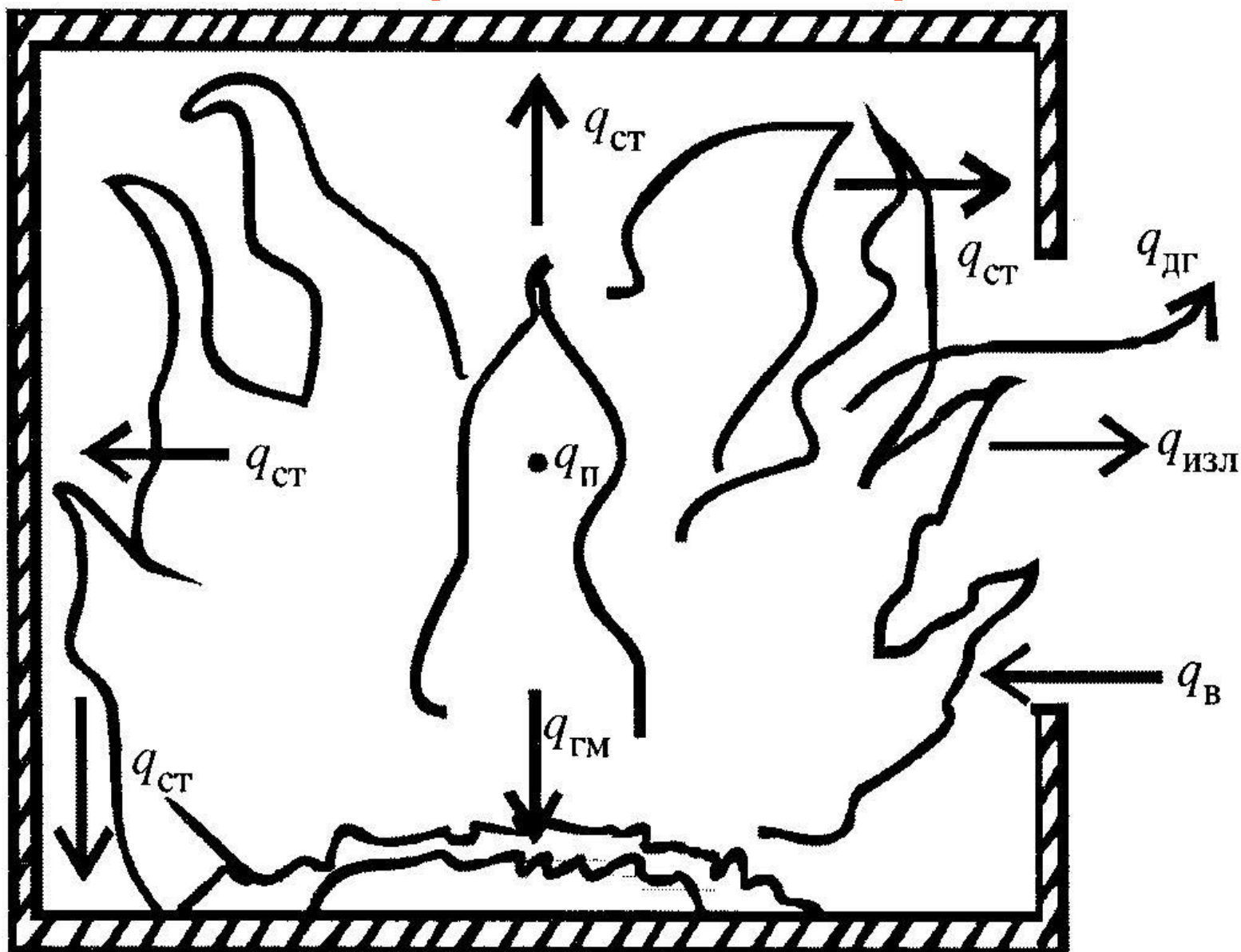
$q_{\text{изл}}$ - интенсивность удаления тепла за пределы помещения через проемы излучением;

$q_{\text{ст}}$ - интенсивность поглощения тепла стенами, потолком, строительными конструкциями;

$q_{\text{гм}}$ - интенсивность поглощения тепла горючими материалами;

$q_{\text{в}}$ - интенсивность поступления в помещение тепла со свежим воздухом.

Схема тепловых потоков для полностью развитого пожара



**Интенсивность тепловыделения
на пожаре
определяют по формуле:**

$$q_n = \beta \cdot \bar{V}_m \cdot Q_c^H$$

где β – коэффициент полноты сгорания
(0.9-0.95);

$\bar{V}_m$ – средняя массовая скорость выгорания
пожарной нагрузки за рассматриваемый интервал
времени Δt , кг/с;

Q_c^H - низшая теплота сгорания пожарной
нагрузки, кДж/кг.

С учетом параметра вентиляции:

$$F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{H}$$

Интенсивность тепловыделения на пожаре
определяется по формуле:

$$q_n = \beta \cdot K \cdot F_{\text{пр}} \cdot \sqrt{H} \cdot Q_c^H$$

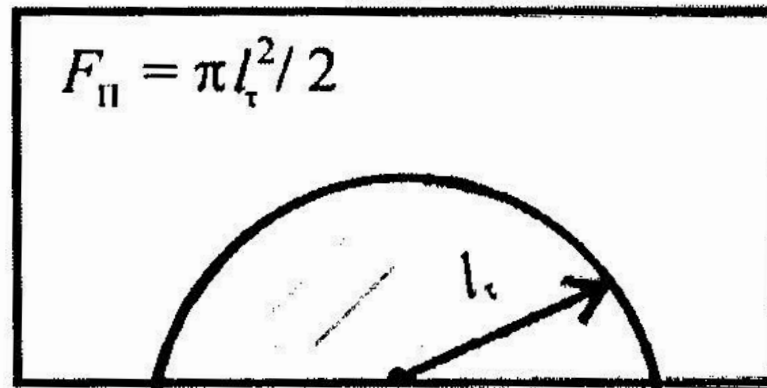
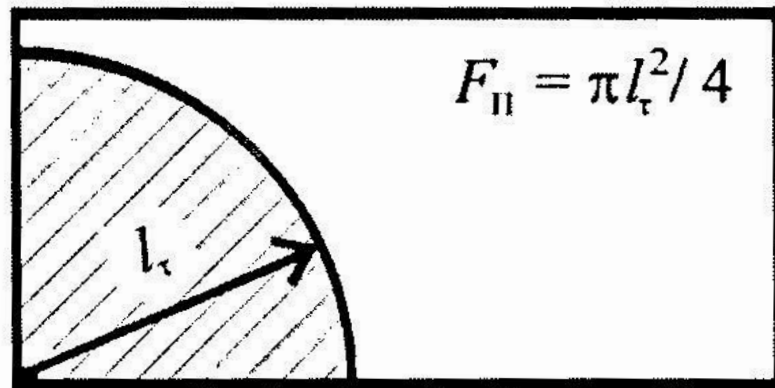
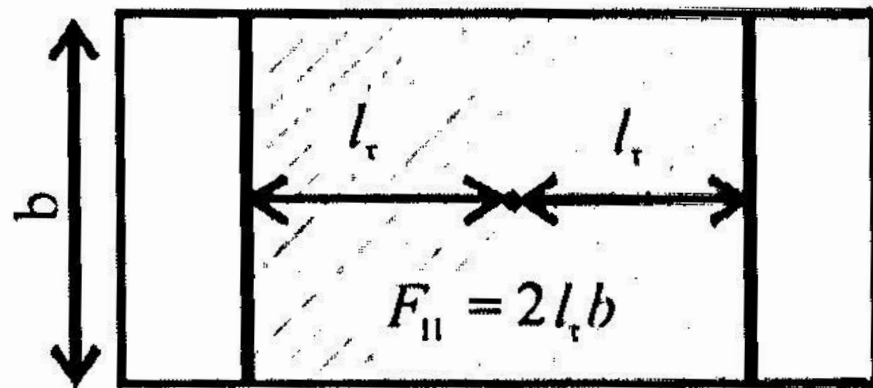
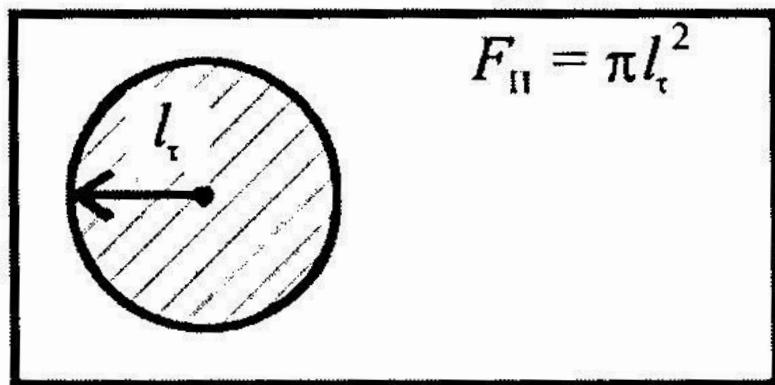
Прогнозирование скорости развития внутреннего пожара

В основе расчета лежит определение *линейной скорости распространения горения* при ряде допущений:

- пожарная нагрузка однородна и равномерно распределена в горизонтальной плоскости;
- распространение пламени по различным направлениям равновероятно;
- отсутствуют факторы, дополнительно влияющие на скорость и направление развития пожара.

Площадь пожара (F_{Π})

в зависимости от места расположения очага
возгорания
рассчитывается по одной из конфигураций:



(F - площадь пожара, м^2 ; l_r - расстояние,
пройденное фронтом пламени ко времени t)

**Усредненная линейная скорость распространения пламени
для помещений различного назначения
и вида пожарной нагрузки**

Характер помещения и вид пожарной нагрузки	Усредненная линейная скорость распространения пламени, м/мин.
Жилые помещения	0.5-0.8
Помещения лесопильных цехов	1.0-5.0
Помещения складов	
льноволокна	3.0-5.6
текстильных изделий	0.3-0.4
бумаги в рулонах	0.2-0.3
синтетического каучука	0.6-1.0

Характер помещения и вид пожарной нагрузки	Усредненная линейная скорость распространения пламени, м/мин.
Помещения в административных зданиях	1.0-1.5
Помещения больниц	0.6-3.0
Помещения театров	1.0-3.0
Холодильные камеры	0.5-0.7
Помещения цехов текстильного производства	0.3-0.6
Помещения с горючими напольными покрытиями	1.7-3.2