



# Топливо и его использование

**Лекция 11. Распространение пламени  
в газах.**

# Распространение пламени

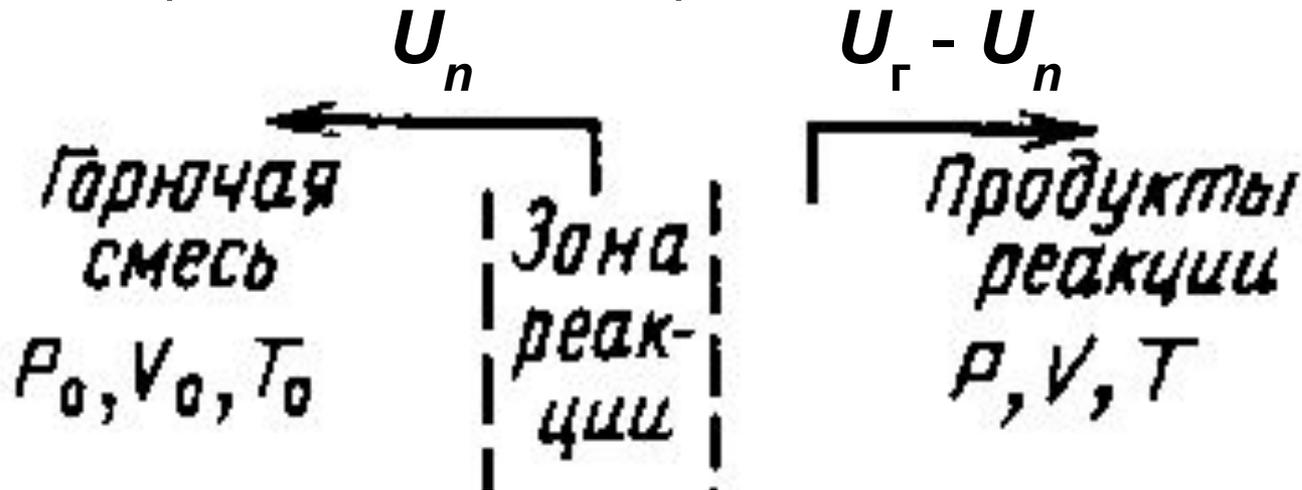
- В топливно-воздушной смеси источник воспламенения (эл. искра или рециркулирующие раскалённые газы) создает узкую **зону химической реакции (пламя)**, которая в результате переноса **теплоты** и диффузии **активных радикалов (O, H, OH)** распространяется от одного слоя смеси к другому.
- Процесс распространения **зоны реакции (пламени)** представляет собой **ряд последовательно идущих непрерывных процессов зажигания**.
- Узкая зона быстрой химической реакции и больших градиентов температуры и концентраций, разделяющая продукты сгорания и свежую смесь, называется **фронтом горения (пламени)**.

# Распространение пламени в неподвижной смеси

Скорость движения зоны реакции относительно исходной смеси, направленная по нормали к поверхности фронта горения, называется **нормальной скоростью** распространения пламени  $U_n$

$$U_n \approx \sqrt{a/\tau_r}, \text{ м/с}; \quad a - \text{температуропроводность смеси, м}^2/\text{с};$$

$\tau_r$  – характерное время протекания химической реакции, с;  $\tau_r \sim 1/k$ ;  
 $k$  – константа скорости химической реакции, с<sup>-1</sup>.



В смеси, находящейся в покое, плоский фронт горения движется со скоростью  $U_n$ , а продукты сгорания отходят от фронта пламени со скоростью  $U_g - U_n$ .

# Распространение пламени в движущейся смеси



В смеси, движущейся навстречу пламени со скоростью

$$W = U_n,$$

пламя (фронт реакции) неподвижно,

а продукты сгорания удаляются от него со скоростью  $U_r$ .

Соотношения между  $U_n$  и  $U_r$  можно определить из баланса количества вещества до и после горения:

$$U_n \rho_o = U_r \rho_r,$$

где  $\rho_o$  – плотность свежей смеси ( кг/м<sup>3</sup>),  $\rho_r$  – плотность продуктов сгорания,  $U_r$ , м/с – скорость движения продуктов сгорания, откуда

$$\frac{U_r}{U_n} = \frac{\rho_o}{\rho_r}$$

т.е. скорость продуктов сгорания относительно пламени  $U_r$  больше, чем скорость свежей смеси  $W = U_n$ , что объясняется **расширением газов при горении**.

**Нормальная** скорость распространения пламени  $U_n$  не зависит от гидродинамических условий, а только **от физико-химических свойств горючей смеси и поэтому является физико-химической константой**.

## НОРМАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В СМЕСЯХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ С ВОЗДУХОМ

| Газ            | Стехиометрическая смесь |         |              | Смесь, в которой $u_n$ имеет максимальное значение |           |                              |
|----------------|-------------------------|---------|--------------|--|-----------|------------------------------|
|                | Содержание, об. %       |         | $u_n$ , см/с | Содержание, об. %                                  |           | $u_{n \text{ макс.}}$ , см/с |
|                | газа                    | воздуха |              | газа   | воздуха   |                              |
| Водород        | 29,5                    | 70,5    | 160–180      | 42–43  | 57–58     | 265–267                      |
| Оксид углерода | 29,5                    | 70,5    | 28–30        | 43–52,5  | 47,5–57   | 41–46                        |
| Метан          | 9,5                     | 90,5    | 28–37        | 9,5–10,5   | 89,5–90,5 | 37–38                        |
| Пропан         | 4,03                    | 95,97   | 40,6–40,8    | 4,26   | 95,74     | 42,9–45,2                    |
| Бутан          | 3,14                    | 96,86   | 34           | 3,3  | 96,7      | 38–40                        |
| Ацетилен       | 7,75                    | 92,25   | 100–128      | 10–10,7  | 89,3–90   | 131–157                      |
| Этилен         | 6,54                    | 93,46   | 60–63        | 7,0–7,4  | 92,6–93   | 63–81                        |

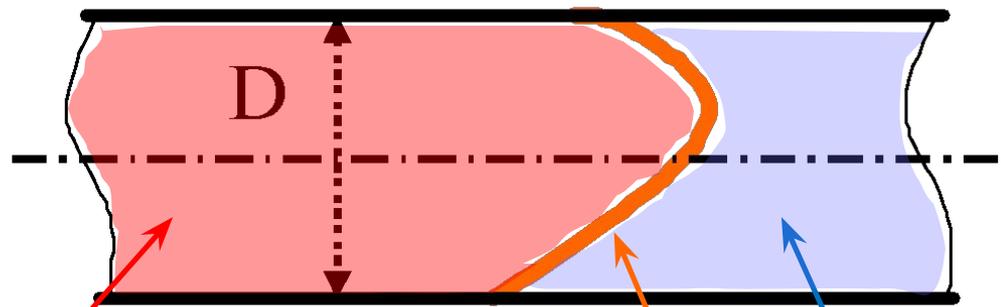
Произведение  $U_n$  на плотность исходного холодного газа  $\rho$  называется **массовой скоростью горения** (сгорания)  $U_m$ , кг/(м<sup>2</sup>с)

$$U_m = \rho U_n$$

и представляет собой массу смеси, сгорающей в единицу времени на единице поверхности фронта пламени.

Характеристикой горения является также **удельное тепловыделение** на единице поверхности фронта пламени в единицу времени, кВт/м<sup>2</sup>.

# Распространение пламени в горизонтальной трубе



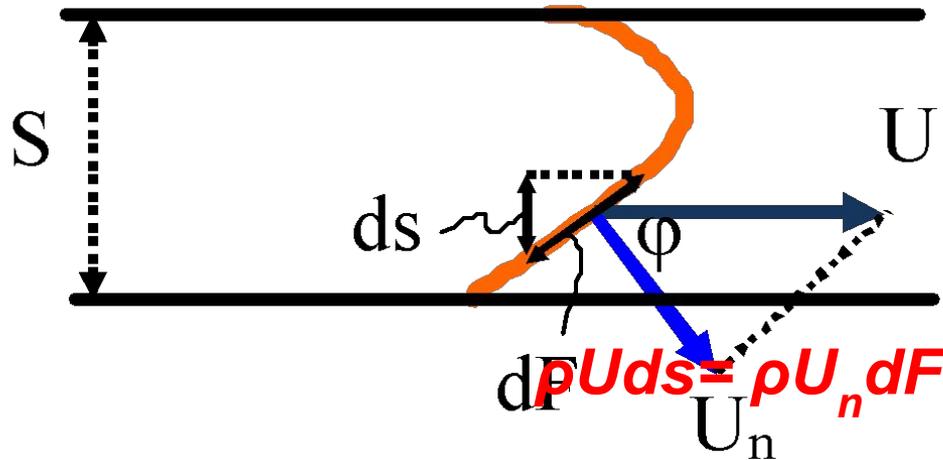
**Фронт пламени**

обычно искривлен, т.к. отделяет **свежую смесь** от **продуктов сгорания**, плотность которых меньше, чем свежей смеси.

Более тяжелая свежая смесь "растекается" по нижней части горизонтальной трубы, вытесняя более легкие продукты сгорания в её верхнюю часть.

Искривление фронта пламени приводит к увеличению площади его поверхности и количества сгорающей на ней смеси.

# Основной закон горения



Массовый расход смеси, сгоревший во фронте горения, равен массовому расходу горючей смеси подаваемой в канал:

где  $U_n$  - нормальная скорость распространения пламени,  $U$  - видимая (наблюдаемая) скорость распространения фронта горения,  $dF$  - элементарная площадь фронта горения,  $dS$  - элементарная площадь поперечного сечения канала.

**Следствия:** 1) Закон площадей.

**Видимая** скорость распространения фронта горения во столько раз больше **нормальной**, во сколько раз площадь фронта горения больше поперечного сечения канала

$$U = U_n \frac{dF}{ds}$$

$$U = \frac{U_n}{\cos \varphi}$$

2) **Закон косинусов.** **Видимая** скорость распространения

пламени возрастает обратно пропорционально  $\cos \varphi = ds / dF$

# Нормальная и видимая скорости распространения пламени в гор. трубе

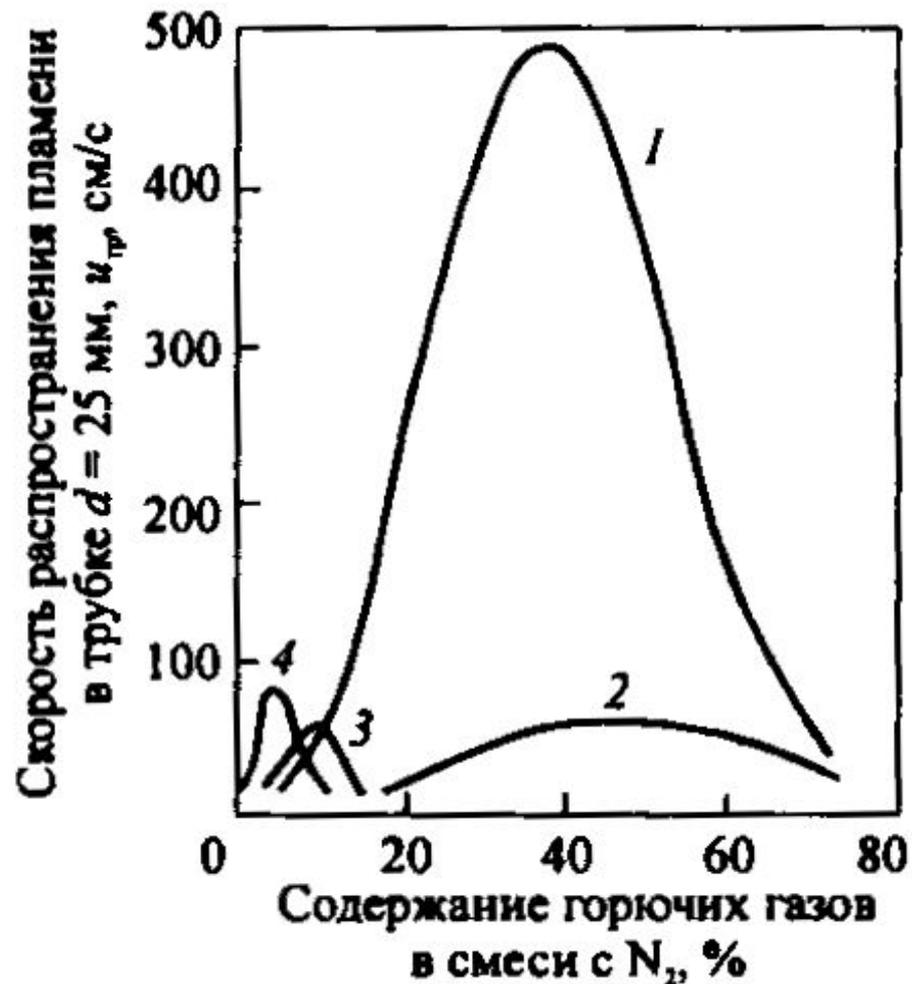
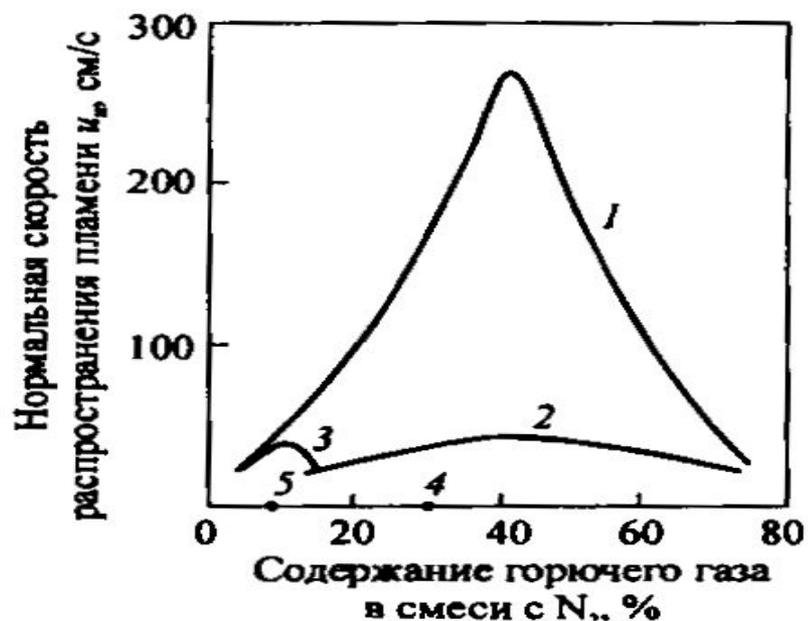


Рис. 6.9. Зависимость нормальной скорости распространения пламени от состава смеси: 1 — водород; 2 — оксид углерода; 3 — метан; точки, соответствующие стехиометрическому составу горючего газа: 4 — для оксидов  $H_2$  и  $CO$ ; 5 — для метана

Рис. 6.8. Зависимость скорости распространения пламени от состава смеси в трубке  $d = 25$  мм: 1 — водород; 2 — окись углерода; 3 — метан; 4 — этан

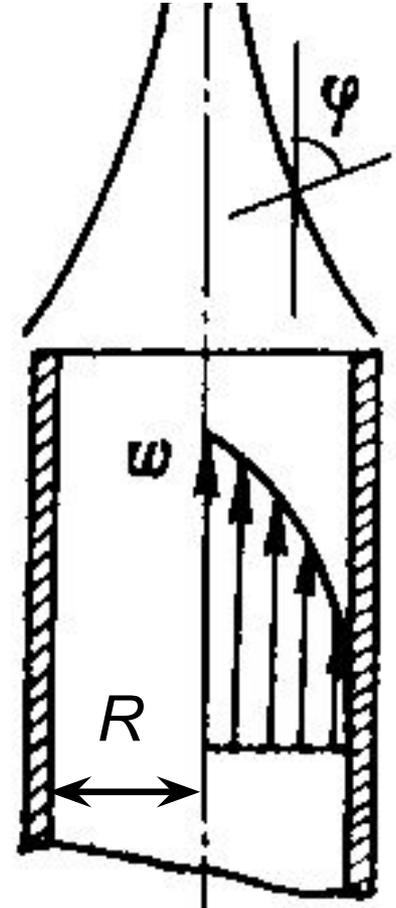
# Ламинарное горение однородной газовой смеси в горелке Бунзена

Перемешанная горючая смесь вытекает из трубы круглого сечения в ламинарном режиме ( $Re < 2000$ ), что соответствует параболическому профилю скоростей в трубе

$$W = W_m \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right],$$

где  $W_m$  – максимальная скорость на оси трубы ( $r = 0$ ), а средняя по сечению скорость

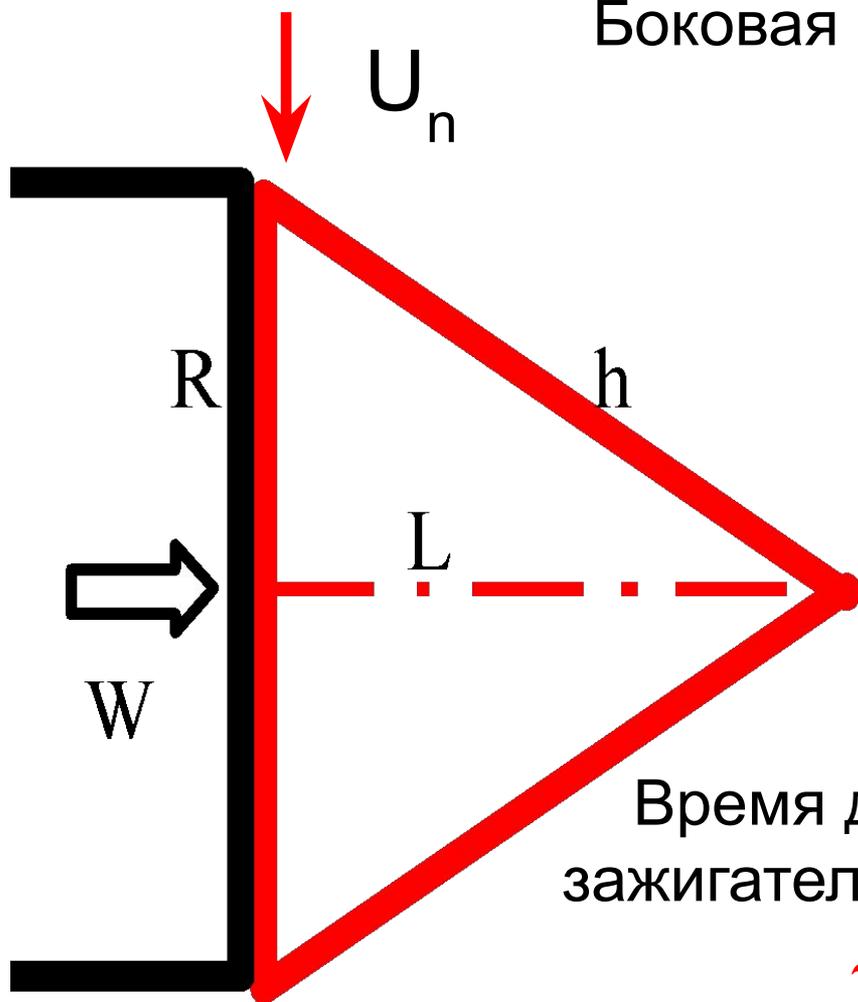
$$\bar{W} = W_m / 2$$



- Поверхность фронта пламени зависит от способа зажигания и характера движения газов.
- При **ламинарном движении** газовой смеси, подаваемой через круглую горелку, и **зажигании ее** по периферии горелки (т.н. **кольцо зажигания**) факел принимает форму **конуса**.

# Характеристики ламинарного пламени при зажигании газовой смеси по периметру устья горелки

Боковая поверхность и объём пламени



$$F \approx \pi R h = \pi R \sqrt{R^2 + L^2}$$

$$V \approx \frac{1}{3} \pi R^2 L$$

R – радиус горелки,  
h – длина образующей,  
L – длина (высота) пламени.

Время движения фронта горения от зажигательного кольца до оси пламени

$$\tau = R/U_n,$$

$$\text{длина пламени} \quad L = W\tau.$$

# Тепловое напряжение объема факела, кВт/м<sup>3</sup>

$$\frac{Q}{V} = \frac{U_m F Q_H^p}{V}$$

где  $U_m = U_n \rho$  – массовая скорость горения, кг/(м<sup>2</sup>с),

$F$  и  $V$  – поверхность (м<sup>2</sup>) и объем (м<sup>3</sup>) факела,

$Q_H^p$  – теплота сгорания газа, кДж/кг,

что приводит к

$$\frac{Q}{V} = \frac{3Q_H^p U_n \rho \sqrt{W^2 + U_n^2}}{RW}$$

Записывая это соотношение для двух горелок различных диаметров при одинаковой скорости смеси в них и принимая во внимание, что нормальная скорость распространения пламени для данной смеси является постоянной величиной, получим

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_1 / \left(\frac{Q}{V}\right)_2 = \frac{R_2}{R_1}$$

т.е. **тепловое напряжение факела** обратно пропорционально радиусу горелки. Это объясняется тем, что **горение протекает на поверхности факела, а в объеме – отсутствует.**

**С уменьшением радиуса горелки** увеличивается поверхность факела, приходящаяся на единицу его объема, и соответственно **увеличивается тепловое напряжение объема факела.**

# Способы сжигания газа

В зависимости от степени смешения газообразного топлива с воздухом до выхода из горелки различают следующие способы сжигания газа:

- горение предварительно приготовленной **однородной газозоудшной смеси**, характеризующейся конкретным значением нормальной скорости распространения пламени  $U_n$ ;
- **диффузионное горение**, при котором газ и воздух предварительно не перемешаны (газовая плита; горение летучих, выделяющихся из частицы твёрдого топлива; горение паров жидкого топлива, испаряющихся с поверхности его капли);
- горение **частично перемешанной газозоудшной смеси** ( $\alpha < 1$ ) в воздушной среде.

# Устойчивость горения однородной газовой смеси при ламинарном движении

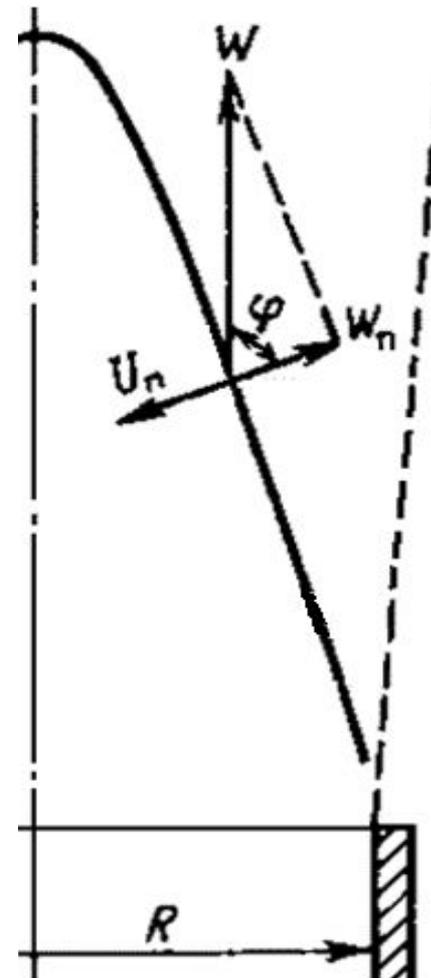
Под **устойчивостью горения** понимается способность горелочного устройства обеспечить **стабильное воспламенение** и **устойчивое положение фронта пламени** в возможно бóлее широком диапазоне скоростей истечения горючей смеси.

## 1. Условие стабильного воспламенения:

при **зажигании** вблизи обреза горелки в точках, где

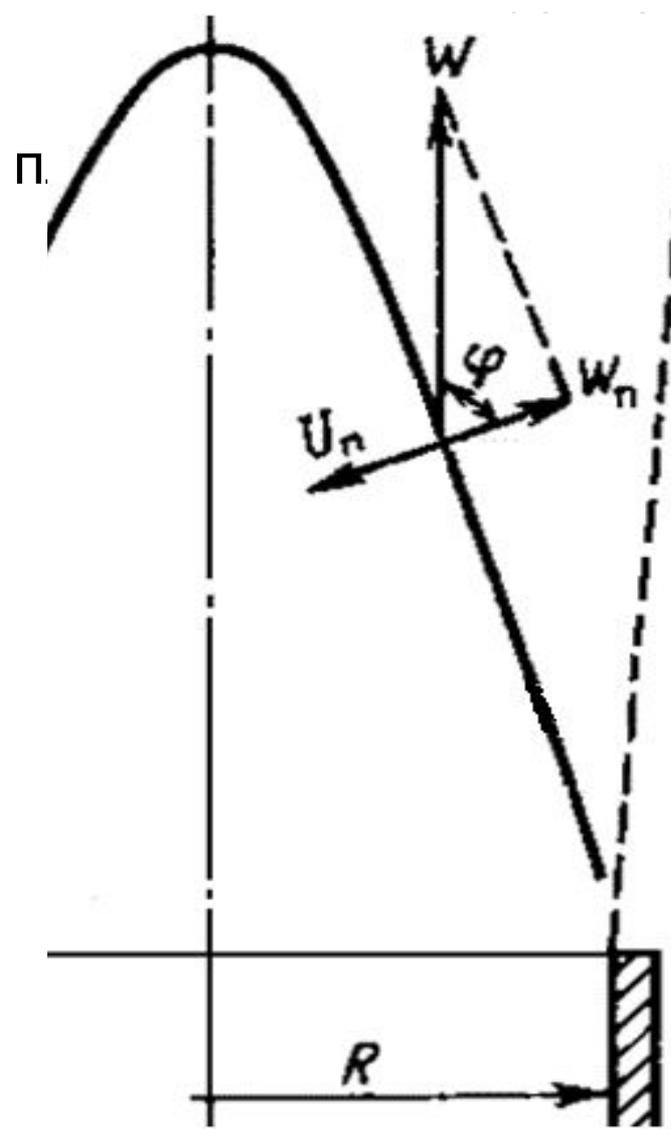
$$W = -U_n$$

пламя держится устойчиво, образуя **зажигающее кольцо**, обеспечивающее непрерывное зажигание поступающей смеси по периферии струи.



## 2. Условие устойчивости положения фронта пламени:

Конусообразный фронт пламени однородной смеси принимает устойчивое положение на поверхности, в каждой точке которой нормальная составляющая скорости движения смеси



то величине нормальной  
ти распространения  
кна ей по  
лению

$$W_n = W \cos \varphi = -U_n$$

$$W = -U_n / \cos \varphi > -U_n$$

Отсюда видно, что видимая скорость струи  $W$  может превышать  $U_n$ , не вызывая **отрыва пламени**, но не должна быть меньше неё во избежание **проскока пламени** в горелку.

# Нижний предел устойчивости пламени

– это допустимая минимальная скорость истечения смеси из горелки, ниже которой возможен **проскок пламени в горелку**.

При увеличении радиуса горелки для соблюдения нижнего предела устойчивости пламени **среднюю скорость смеси  $W$**  необходимо увеличить пропорционально  **$R$** ,  
а **расход смеси  $V$**  – пропорционально  **$R^2$**

$$\frac{\bar{W}_2}{\bar{W}_1} = \frac{R_2}{R_1}, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

# Область устойчивого горения в горелках атмосферного типа



В факеле с воспламенением от зажигающего кольца у кромки горелки горение устойчиво в узких пределах скорости смеси.

При малых скоростях истечения возможен **проскок пламени** в горелку, а при больших скоростях – **отрыв пламени** от горелки и его погасание

Для метана и природного газа область устойчивого горения охватывает смеси с избытком воздуха  $\alpha = 0-0.6$

# Верхний предел устойчивости пламени

– максимальная скорость истечения струи, при которой происходит отрыв пламени и погасание факела, называется верхним пределом устойчивости пламени.

В бедной смеси (высокие  $\alpha$ ) область устойчивого горения сокращается, из-за уменьшения скорости распространения пламени и температуры горения. Кроме того, у кромок горелки смесь ещё разбавляется из-за подсоса окружающего воздуха среды. Зажигающее кольцо становится менее мощным, и вызванный увеличением  $\alpha$  рост скорости газа может привести к отрыву и угасанию пламени.

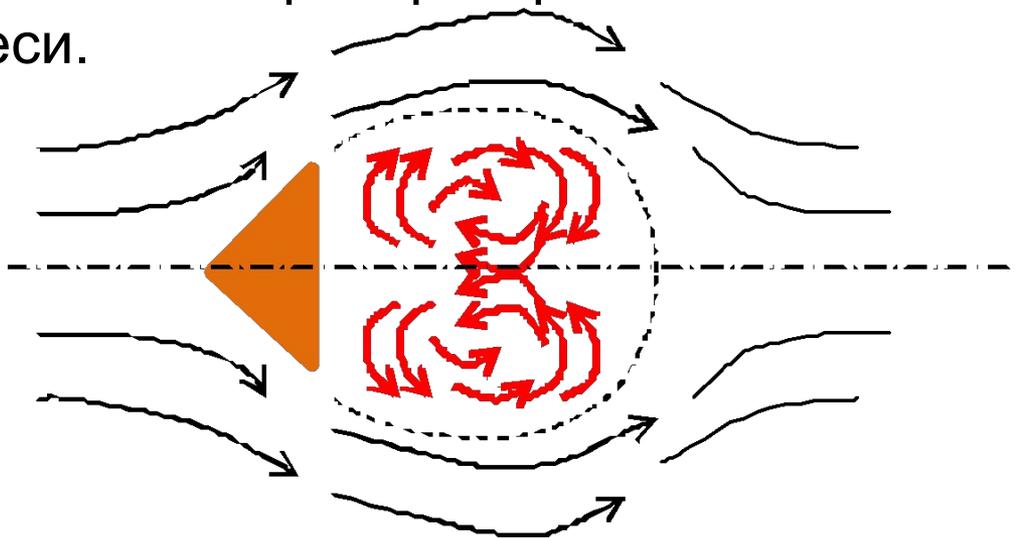
Проскок и отрыв пламени нарушают нормальную работу горелки и могут стать причинами аварии. Кроме того эти явления ограничивают производительность горелки.

Предотвратить проскок пламени можно путём водяного охлаждения устья горелок, а отрыв – неполным смешением топлива и воздуха (ограничением  $\alpha$ ).

## Схема организации зажигания рециркуляцией продуктов сгорания за плохообтекаемым телом.

В котлах горючая смесь подается в топочную камеру через горелки со скоростью 30–50 м/с, а в **форсированных камерах сгорания** эта скорость достигает 150–200 м/с. В то же время **скорость распространения пламени** в зоне воспламенения значительно меньше и составляет для энергетических топлив несколько метров в секунду. Это делает зажигающее кольцо недостаточным для реализации стационарного факела.

При указанном соотношении скоростей **необходимо наличие в топке непрерывного мощного источника зажигания**, от которого пламя может распространяться по всему сечению потока горючей смеси.



**Очаги зажигания** в виде вихревых зон горячих продуктов сгорания создаются с помощью горелочных устройств.



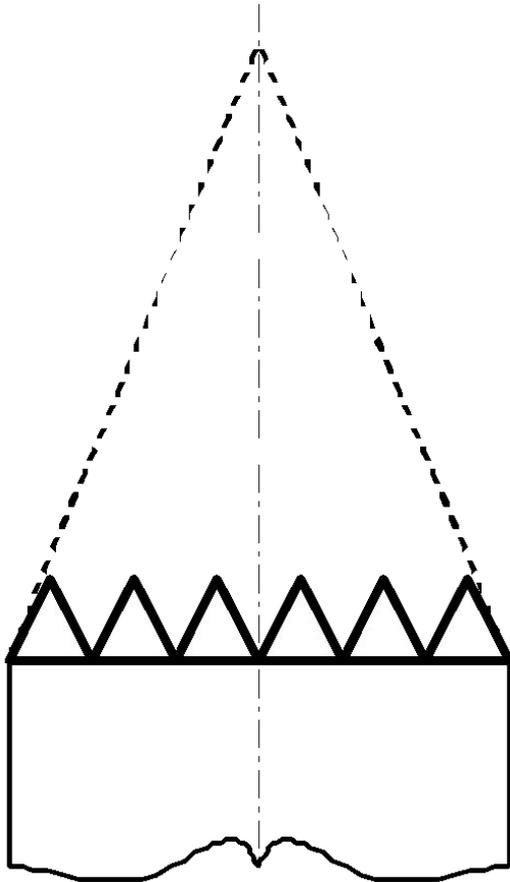
**В вихревых горелках** зажигающая зона создается аэродинамическими средствами путем закручивания горючей смеси, вытекающей из горелки при помощи лопаточного аппарата, помещаемого на выходной или входной части горелки.

В некоторых случаях приемы стабилизации комбинируют – для усиления вихревого течения за плохообтекаемым телом в выходном сечении горелки воздуху предварительно сообщают закрутку.

# Микрофакельное сжигание газовой смеси

Если поток газовой смеси, выходящей из устья горелки, разбить на множество мелких струй, то поверхность пламени, приходящаяся на единицу объема факела, резко возрастает и соответственно увеличится тепловое напряжение объема факела

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_1 / \left(\frac{Q}{V}\right)_2 = \frac{R_2}{R_1}$$



Такое горение, названное **микрофакельным**, организуют путем размещения металлической решетки на устье круглой горелки. Газовоздушная смесь, пройдя решетку, разбивается на мелкие струи. Очагами зажигания струй являются вихревые зоны продуктов сгорания высокой температуры, которые образуются за простенками решетки.

# Микрофакельное сжигание газовой смеси

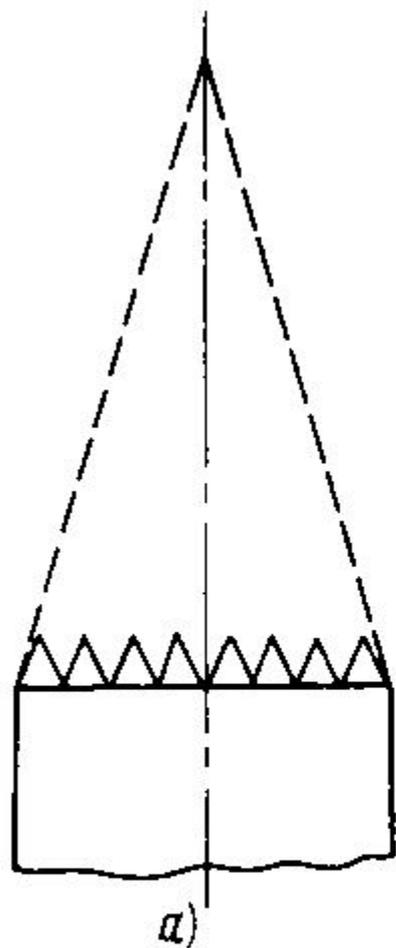


Рис. 6.11. Микрофакельное горение:

а — структура микрофакельного горения; б — микрофакельная горелка в действии; в — развитое зажигание по сечению у устья микрофакельной горелки

# Интенсификация горения газовых топлив

Горение интенсифицируется с переходом к турбулентному режиму движения газа и соответствующим увеличением скорости распространения фронта пламени. Скорость турбулентного распространения пламени определяется интенсивностью тепло- и массообмена и скоростью химического реагирования в потоке горючей смеси.

По аналогии с нормальной скоростью распространения

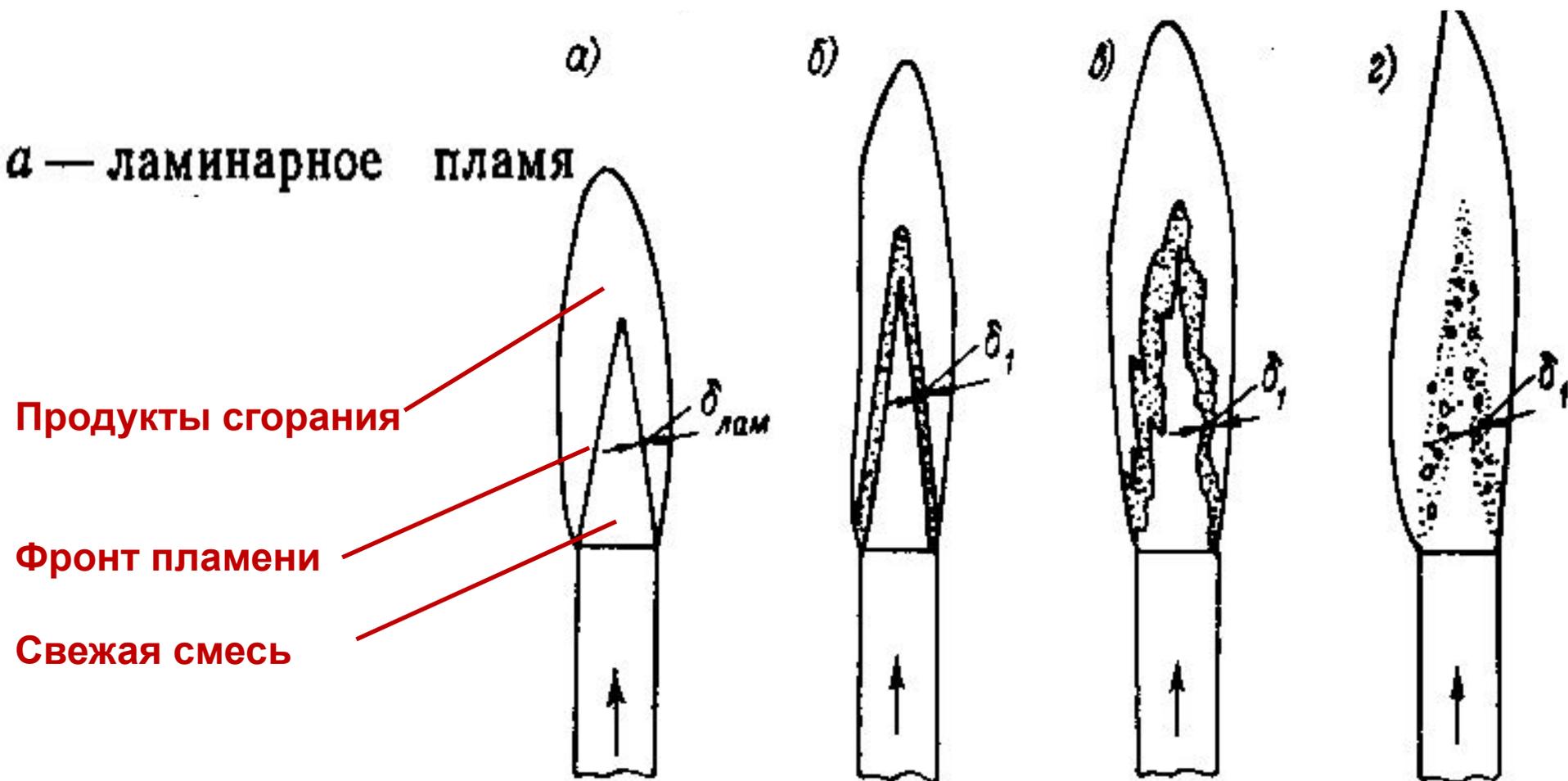
пламени  $U_n \propto \sqrt{a/\tau_r}$  вводится скорость турбулентного распространения пламени, которая в отличие от  $U_n$  не является физико-химической константой конкретной смеси, а зависит от гидродинамических характеристик течения смеси

$$U_T \propto \sqrt{\frac{a + a_T}{\tau_r}} \propto \sqrt{\frac{a + l_T u'}{\tau_r}} \Rightarrow \frac{U_T}{U_n} \propto \sqrt{1 + \frac{l_T u'}{a}}$$

При развитой турбулентности

$$\frac{U_T}{U_n} \propto \sqrt{\frac{l_T u'}{a}} \propto \sqrt{\text{Re}}$$

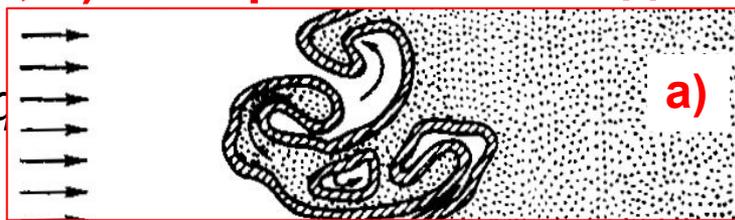
# Влияние турбулентности на горение смеси



б — мелкомасштабная турбулентность; в — масштаб турбулентности превышает толщину зоны горения; г — крупномасштабная турбулентность

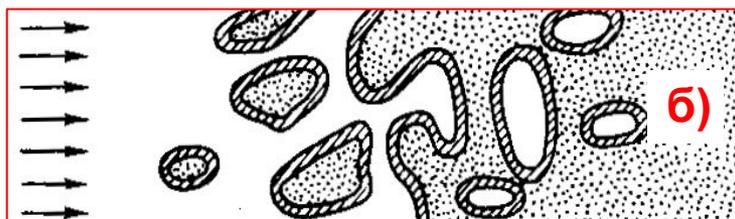
# Модели турбулентного горения газовой смеси

**а, б) Поверхностные модели** обуславливают увеличение скорости



верхности **ламинарного** течения (а)

$$U_T = U_n \frac{F_T}{F}$$



течения (б)

$$U_T \propto U_n \text{Re}$$

**в) Объемная модель** вводит в теорию **ламинарного** пламени зону подогрева смеси и турбулентные к-



турбулентности

$$U_T / U_n \approx \sqrt{D_T / D} \approx \sqrt{a_T / a}$$

**г) Микрообъемная модель** рассматривает турбулентное горение как совокупность актов быстрого молекулярного смешения исходной смеси и горячих продуктов сгорания в вихревых



вихревых течениях протекает по законам

более высокой, чем в ламинарном пламени.

# Диффузионное горение на примере пламени свечи



Углеводороды при нагреве в отсутствие  $O_2$  разлагаются с образованием сажи и  $H_2$  (при  $t < 950^\circ C$  разлагается 26% метана, при  $t > 1150^\circ C$  почти 90%).

**Особенность – раздельная подача топлива и окислителя.**

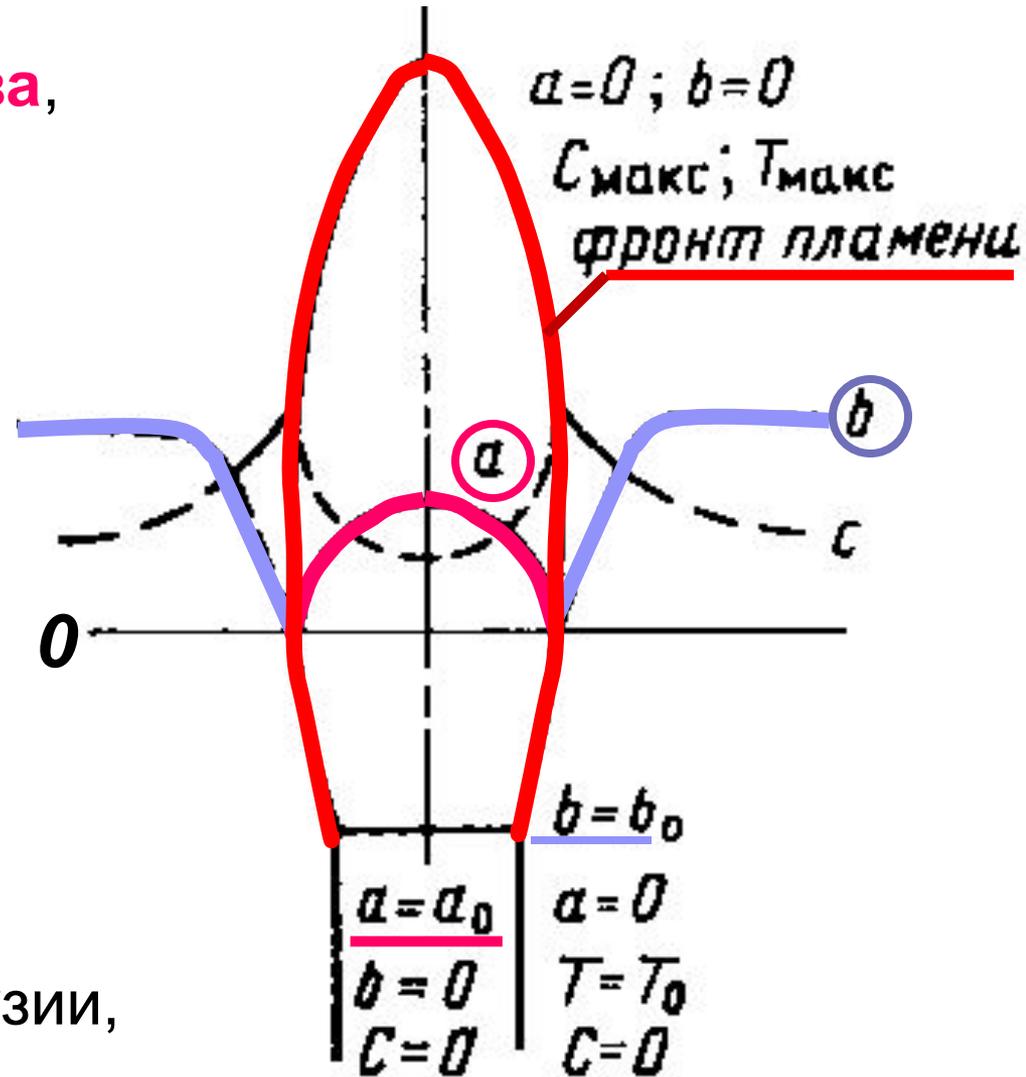
Воск плавится, фильтруется по фитилю вверх и испаряется с частичным разложением паров в нижней бескислородной зоне.

Воздух поднимается вдоль горячего факела из-за **естественной конвекции**. Скорость реакции между углеводородными парами и  $O_2$  воздуха **ограничена скоростью их молекулярной диффузии**.

Образующиеся в зоне термического разложения частицы **сажи** являются причиной яркой **светимости** пламени.

# Структура ламинарного диффузионного пламени

**a** – концентрация топлива,  
**b** – кислорода,  
**c** – продуктов сгорания



Длина факела

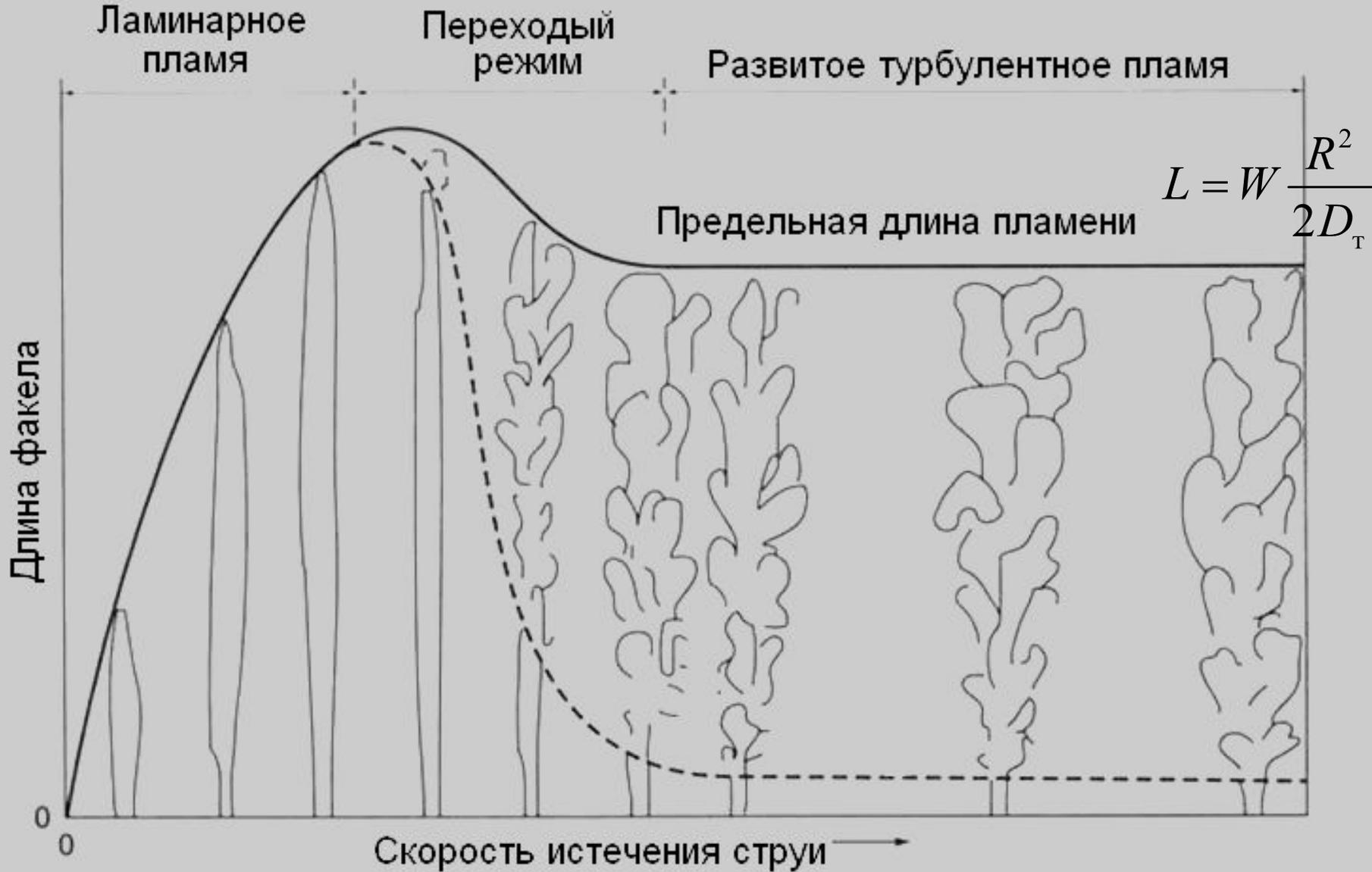
$$L = W\tau = W \frac{R^2}{2D}$$

**R**- радиус горелки,  
**D** – к-т молекулярной диффузии,  
**W**- скорость истечения.

# Микрофакельное диффузионное горение



# Изменение режима диффузионного пламени



# Турбулентное пламя



# Турбулентное диффузионное горение

а)

Структура **ламинарного** (а) и **турбулентного** (б) факелов:

1 – газ (топливо)

2 – воздух

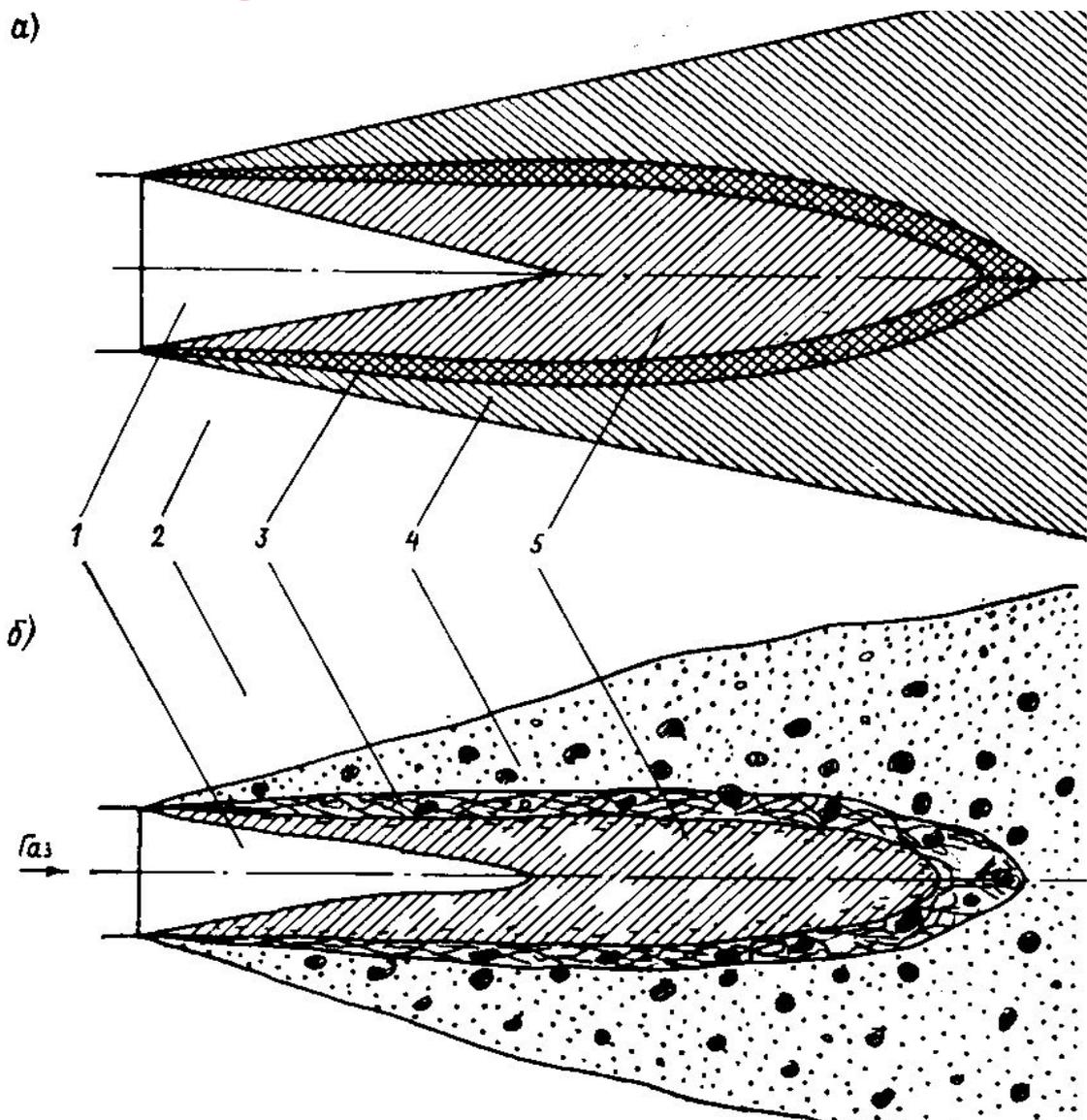
3 – продукты сгорания

4 – воздух+продукты

5 – газ + продукты.

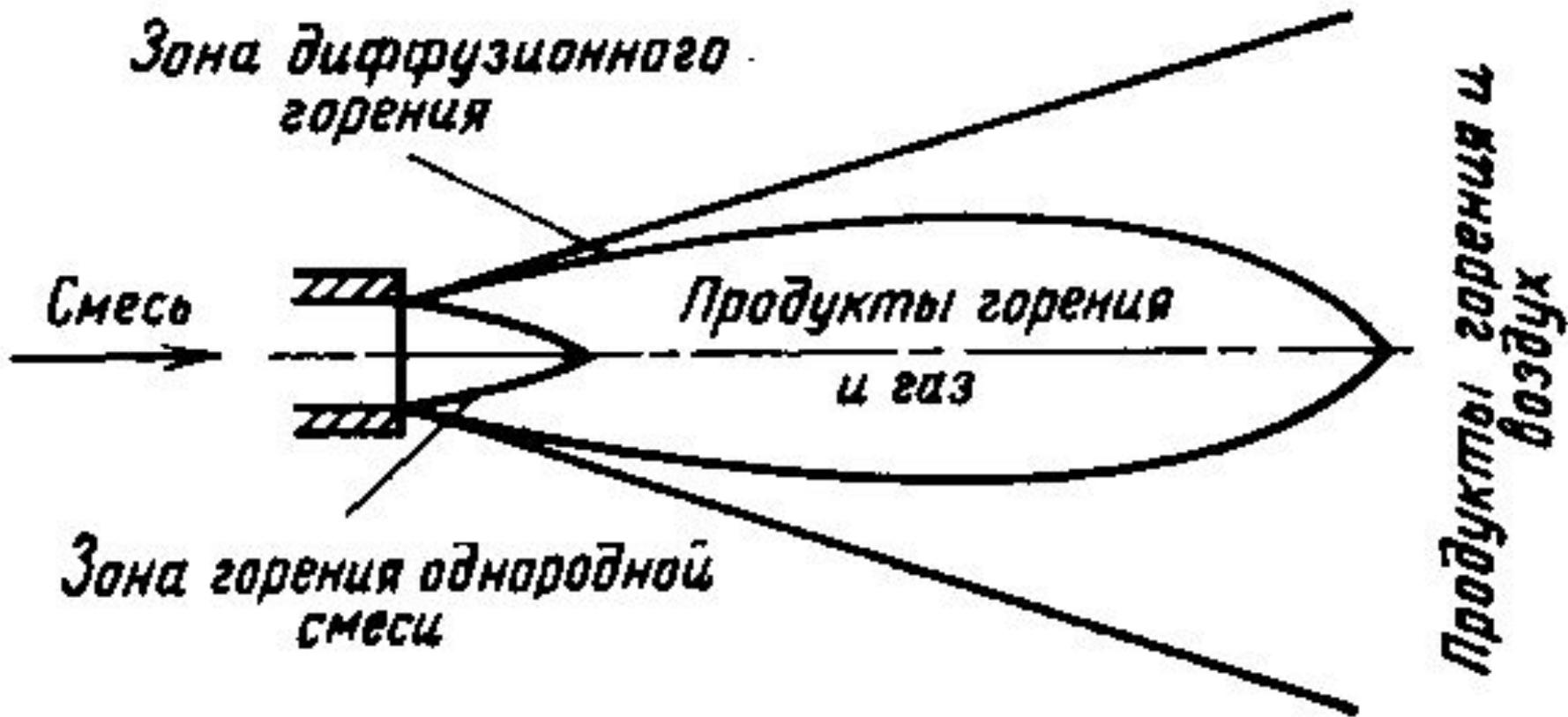
б)

б) нет чёткого деления на зоны; в объёмах "зон" – очаги микрообъёмного горения



- + При диффузионном сжигании **проскок пламени в горелку невозможен**;
- Недостаток диффузионного горения – химическая неполнота сжигания.

# Горение частично перемешанной богатой смеси в окислительной среде





Для осуществления полного горения газа решающее значение имеет смесеобразование.

**При раздельной подаче газа и воздуха** (диффузионное горение) имеет место **максимальная химическая неполнота сгорания.**

При смешении с газом некоторого количества **первичного** воздуха неполнота горения, образующаяся в зоне диффузионного горения, уменьшается.

**Полностью перемешанная** газозвоздушная смесь может сгорать без образования продуктов неполного сгорания, однако при этом **сужаются пределы устойчивого горения.**

# Методы интенсификации сжигания газов

- Предварительный подогрев воздуха и топлива в случае сжигания низкокалорийных газов.
- Подача всего воздуха, необходимого для горения, в корень факела. При этом следует добиваться возможно лучшего предварительного смешения газа с воздухом.
- Организация устойчивого зажигания, обеспечивающего горение при возможно высоких скоростях истечения газозоодушнор смеси из горелок.
- Организация зажигания по развитому периметру для получения соответственно развитой поверхности воспламенения и горения.
- В топочных устройствах вместо большого числа круглых горелок малого диаметра целесообразно применение узких щелевых горелок.
- Интенсификация выгорания путем усиления тепло- и массообмена в зоне дожигания (вторичное закрученное дутье и т.п.).

Скорость химического реагирования растет с увеличением температуры и концентрации реагирующих веществ. Для повышения температуры смеси применяется **предварительный подогрев воздуха**, идущего на горение, а в случае сжигания низкокалорийных газов – также и самого топлива.

При применении предварительного подогрева газов следует учесть, что при сильном нагреве возможно **термическое разложение** содержащихся в них тяжелых углеводородов, что нежелательно.

В случаях, **когда объем воздуха**, идущего на горение, **значительно больше объема сжигаемого газа**, как при сжигании природного газа, **роль подогрева воздуха больше, чем подогрева газа**.

Даже при существенном предварительном подогреве воздуха и газа, **основной нагрев горючей смеси до ее воспламенения происходит в топочной камере** за счет диффузии в нее высоконагретых продуктов сгорания.