



## УЧЕБНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

***Наименование:***

**Методы сжигания газа.  
*Раздел 3.***

***Курс:* Безопасная эксплуатация объектов  
газопотребления на «БМЗ»**

***Код: УЭ 840-УЦ-024-2012***

---



**Горение природного газа** - это сложный физико-химический процесс взаимодействия горючих его составляющих с окислителем, при котором происходит преобразование химической энергии топлива в световую и тепловую энергию, а также паров воды и углекислого газа.





**Горение бывает полным и неполным.**

Полное горение происходит при: непрерывной подаче топлива и воздуха в достаточном количестве, хорошем перемешивании газа с воздухом, достаточной температуре в топке.



Невыполнение этих условий приводит к неполному сгоранию топлива, при котором выделяется меньшее количество тепла, образуются газообразные продукты неполного сгорания - окись углерода ( $\text{CO}$ ), водород ( $\text{H}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), а также сажа, оседающая на поверхностях нагрева, ухудшающая теплообмен и увеличивающая потери тепла, что приводит к перерасходу топлива и снижению коэффициента полезного действия (КПД) котла, загрязнению атмосферы.





Реакция горения углеводородов с общей формулой  $C_mH_n$  описывается и уравнением:



В соответствии с этим можно записать реакции горения основных компонентов природного и сжиженного газов и определить необходимое количество кислорода и воздуха:





Согласно формуле ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ), 1 молекула метана требует 2 молекулы кислорода, то есть на 1 м<sup>3</sup>  $\text{CH}_4$  требуется 2 м<sup>3</sup>  $\text{O}_2$ . Но это кислород, а в воздухе только 1/5 кислорода.

Тогда для сгорания **1 м<sup>3</sup>** метана нужно **2 м<sup>3</sup>** кислорода ( **$\text{O}_2$** ), который содержится в **9,52 м<sup>3</sup>** воздуха. Но это теоретически.

Для полного сжигания природного газа воздух подают в топку с некоторым избытком.

$$\alpha = \frac{V_{\text{прак}}}{V_{\text{теор}}} \boxtimes 1$$



Отношение действительного расхода воздуха  $V_d$  к теоретически необходимому  $V^\circ$  называется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = V_d/V^\circ$ .

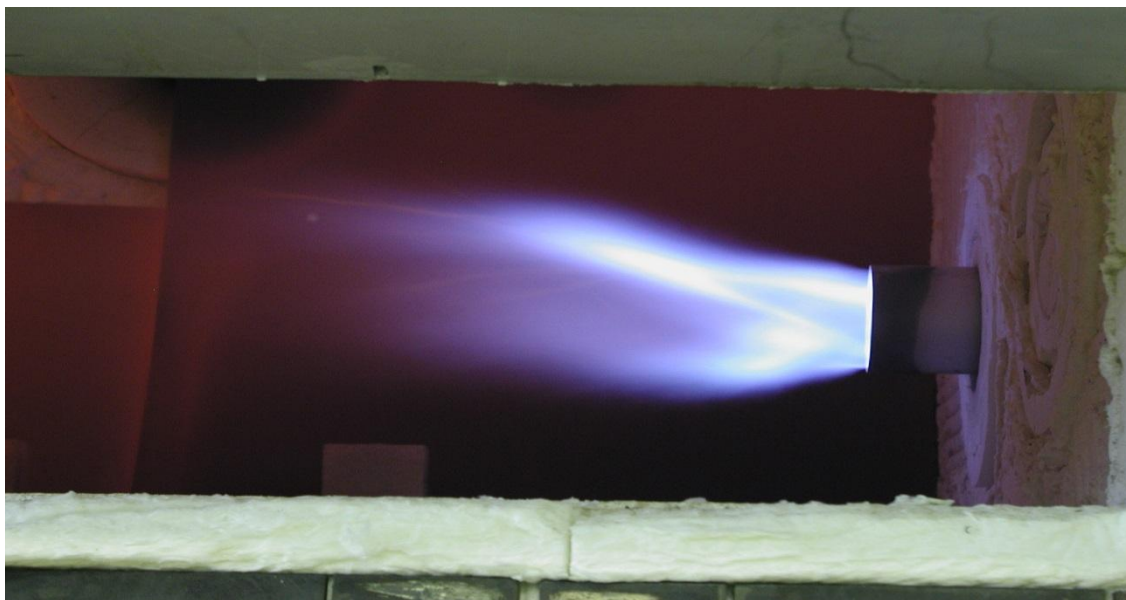
Этот показатель зависит от конструкции газовой горелки и топки: чем они совершеннее, тем меньше  $\alpha$ .

Необходимо следить, чтобы коэффициент излишка воздуха не был меньше **1**, так как это приводит к неполному сгоранию газа, создавая тем самым угрозу отравления персонала.

---



Увеличение коэффициента избытка воздуха снижает коэффициент полезного действия (КПД) теплоиспользующей установки за счет увеличения потерь теплоты с уходящими газами, а при более значительном увеличении количества воздуха может произойти отрыв пламени, создав аварийную ситуацию.



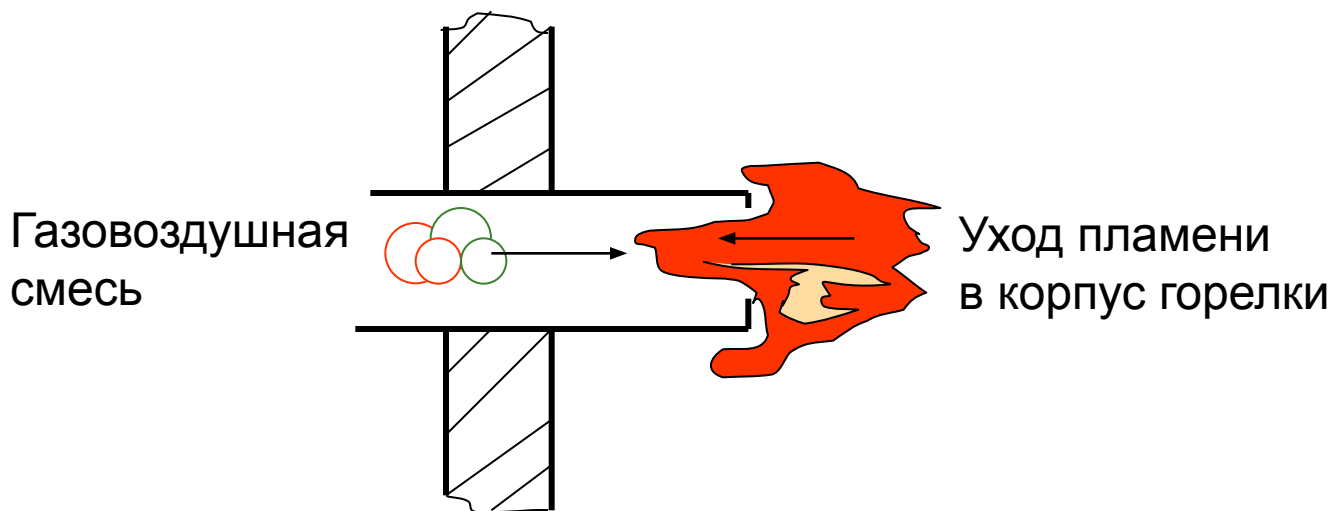
Современные горелки позволяют или требуют чтобы  $\alpha = 1,02$ , а это очень хороший показатель.





**ПРОСКОК ПЛАМЕНИ** - явление, характеризующееся уходом пламени внутрь корпуса горелки.

Во время включения и выключения горелки и в периоды резкого снижения ее тепловой мощности скорость смеси на выходе из устья может оказаться меньше скорости распространения пламени. В таких случаях, а также при чрезмерном нагреве устья горелки может произойти затягивание, или проскок, пламени внутрь горелки.





### Причины проскока пламени:

- уменьшение давления газа;
- уменьшение давления воздуха;
- уменьшение разряжения или увеличение давления в печи;
- применение горелок других технических характеристик;
- перегрев горелок.





**ОТРЫВ ПЛАМЕНИ** - явление, характеризуемое общим или частичным отрывом основания пламени над отверстиями горелки или над зоной стабилизации пламени.

При скорости выхода смеси, превышающей скорость распространения пламени, происходит частичный или полный отрыв пламени, что ведет к большому недожогу газа и может явиться причиной образования в топке взрывоопасной смеси.





### Причины отрыва пламени:

- повышение давления газа;
- повышение давления воздуха подающегося на горение;
- увеличение разряжения или уменьшения давления в печи;
- применение горелок других характеристик.





Полноту сгорания топлива можно определить с помощью газоанализатора и визуально - по цвету и характеру пламени.

Полнота сгорания определяется цветом пламени:

**краснота пламени – воздуха мало**

соломенно-голубоватое пламя – **полное сгорание**





**Пламя представляет собой тонкую зону**, в которой происходит химическая реакция горения и которая отделяет продукты сгорания от свежей смеси. В каждый момент времени в результате передачи теплоты от фронта пламени происходит воспламенение прилегающих слоёв газа, что и воспринимается как распространение пламени. Нагреву способствует также диффузия между продуктами сгорания и свежей газовой воздушной смесью.





**В зависимости от характера движения горючей смеси** - ламинарное или турбулентное, соответственно, различают ламинарное и турбулентное горение.

**Ламинарное движение** – движение слоистое, упорядоченное, при котором отдельные слои газового потока скользят относительно друг друга, не смешиваясь между собой.

**Турбулентное движение** – движение неупорядоченное, когда частицы газового потока движутся по сложным, всё время изменяющимся траекториям и в потоке происходит их интенсивное перемешивание. Турбулентное движение всегда обладает более высокой скоростью, чем ламинарное движение.

---



**Теплота сгорания** показывает, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании единицы топлива. Для твердого и жидкого топлива такой единицей служит 1 кг, для газообразного – 1 м<sup>3</sup> при нормальных условиях. **Единица измерения теплоты сгорания** – Дж/м<sup>3</sup> или кратные единицы кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>, МДж/кг. МДж/м<sup>3</sup>. Используют также внесистемную единицу ккал/кг и ккал/м<sup>3</sup> (1 ккал = 4,187 кДж).





**Температура воспламенения** – это минимальная температура смеси, при которой развивается цепная реакция горения. Температура воспламенения различных видов печного газообразного топлива в воздухе, при атмосферном давлении, составляет примерно 650-750 °С. При зажигании топливо и воздух подают на запальники, которыми могут быть раскаленная футеровка, горящий факел, электрическая искра.



Газовоздушная смесь может воспламеняться, когда доля топлива в объеме смеси находится в определенных пределах. Дело в том, что в определенном интервале соотношений объема топлива и воздуха, а именно между **нижним и верхним пределами воспламенения**, возникают условия для протекания цепной реакции горения.

Наименьшее содержание горючего газа в смеси с воздухом, при котором смесь при начальной температуре 20 °С, загорается от источника огня называется **нижним пределом воспламенения**, наибольшее содержание горючего газа, при котором смесь загорается, - **верхним пределом**.





Для доменного газа нижний предел воспламенения составляет 40%, верхний – 70%, для коксового газа – соответственно 6% и 30%, для природного газа – 4.5% и 17% (по метану - 5% и 15%)

***Содержание горючего газа в смеси с воздухом при полном сжигании топлива в печах и контролируемом избытке воздуха всегда находится в интервале между нижним и верхним пределами.***





## Температура самовоспламенения и концентрационные пределы воспламенения (взрыва) наиболее распространенных горючих газов

Газ	Температура самовоспламенения, °С	Концентрационные пределы воспламенения газа в смеси с воздухом, %		Газ	Температура самовоспламенения, °С	Концентрационные пределы воспламенения газа в смеси с воздухом, %	
		нижний	верхний			нижний	верхний
Метан	650	5	15	Пропан	500	2,37	9,5
Ацетилен	335	2,5	80	Этан	510	3,2	12-45
Бутан	430	1,86	8,41	Водород	530	4	74,2



**Для обеспечения полного сгорания газа необходимо соблюдения пять условий:**

- а) достаточный подвод воздуха;
  - б) предусматривать качественное перемешивание газа с воздухом;
  - в) предусматривать своевременный полный отвод продуктов сгорания из зоны горения;
  - г) поддерживать в зоне горения достаточно высокую температуру - не ниже 1200°C;
  - д) не допускать касания факелом поверхностей нагрева.
- Продукты полного сгорания а) пары воды б) углекислый газ.

При несоблюдении хотя бы одного из этих условий наступит реакция неполного горения.

---



Например:

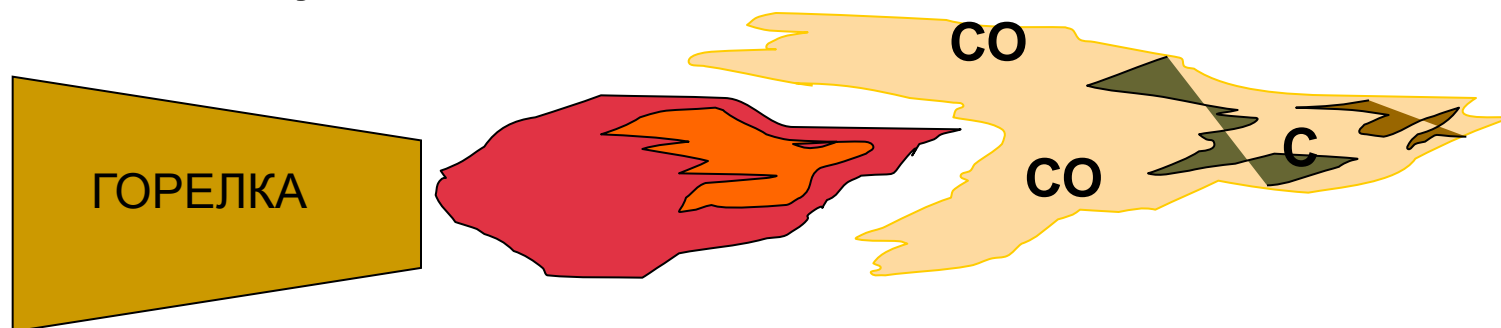
1).  $\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}$  – угарный газ

2).  $\text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{C}$  – чистый углерод

3).  $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_4$

**НЕПОЛНОЕ СГАРАНИЕ...**

**Газовое топливо необходимо сжигать при полном  
отсутствии химического недожога**



Присутствие угарного газа (CO) и сажи (C) в  
продуктах сгорания недопустимо

CO – угарный газ (оксид углерода) вызывает тяжелое отравление.

C – углерод (сажа) на стенках труб уменьшает теплопроводность в 400 раз



- 1). CO – отравляет человека и при концентрации в объёме 1% через 1-2 минуты наступает смерть;
  - 2). C – чистый углерод – Сажа – это плохой проводник тепла. Её теплопроводность в десятки раз меньше теплопроводности стали. Но ещё одна опасность – она накапливается в газоходах и при определённых условиях может взрываться, то есть наступает неуправляемый процесс горения сажи.
  - 3). CH<sub>4</sub> – не участвует в горении, собирается в верхней части топки, газохода и также при определённых условиях может взрываться.
- И кроме этого все три продукта (CO, C, CH<sub>4</sub>) это же горючие компоненты топлива, а мы это тепло потеряли.
-



## Методы (способы) сжигания газа

В зависимости от способа образования газовой смеси, существуют такие виды методов сжигания газа:

метод внешнего смешивания газа с воздухом  
**(диффузионный способ)**

метод частичного внутреннего (предварительного) смешивания  
газа с воздухом  
**(диффузионно - кинетический или смешанный способ)**

метод полного внутреннего смешивания газа с воздухом  
**(кинетический способ)**

---





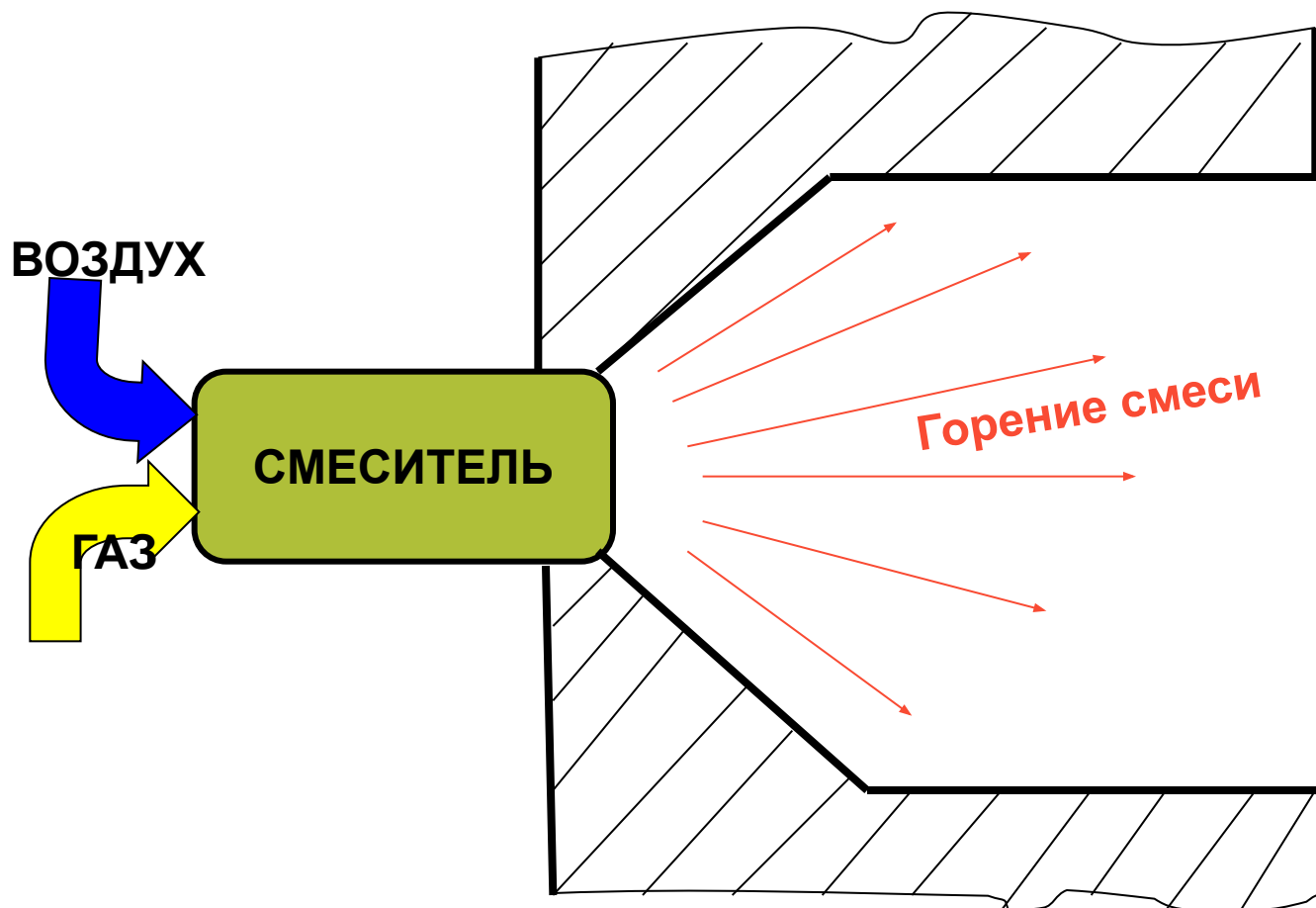
Разные воздуха имеют свои названия. Первичным условно считается воздух, который подаётся на процесс горения до его начала, то есть он подаётся внутрь горелки. Вторичным – условно считается воздух, который подаётся в топку. Тогда мы имеем:

**Диффузионный метод** – использует только вторичный воздух.

**Диффузионно – кинетический** метод – использует как вторичный так и первичный воздух

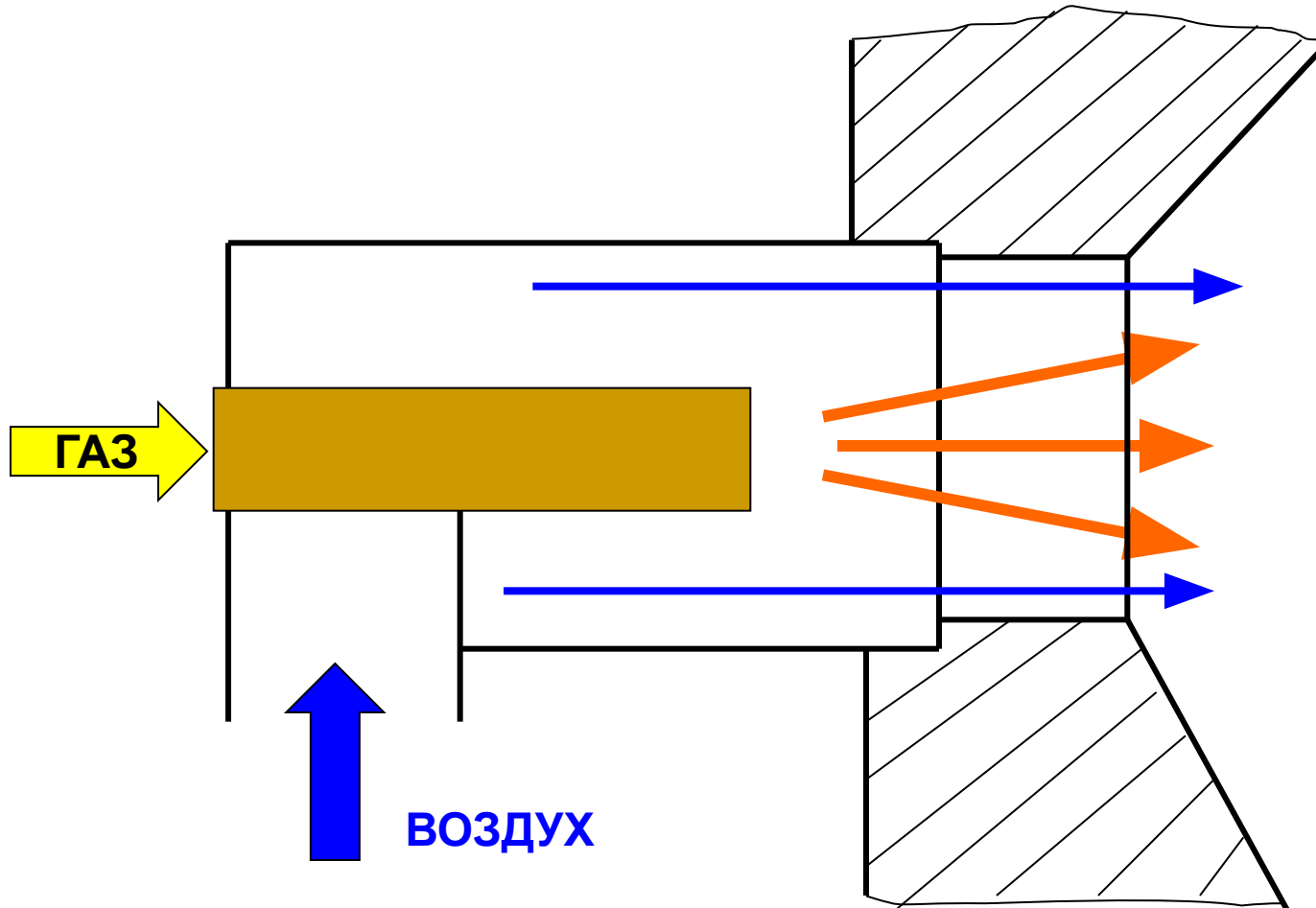
**Кинетический метод** - использует только первичный воздух.

---



Горение заранее подготовленной смеси называется кинетическим

---



Горение, протекающее одновременно со смесеобразованием называется диффузионным

---



## *Диффузионный способ*

ДИФФУЗИЯ (от латинского diffusio распространение, растекание, рассеивание) - движение частиц среды, приводящее к переносу вещества и выравниванию концентраций или к установлению равновесного распределения концентраций частиц данного сорта в среде.

Диффузный метод горения заключается в подаче к фронту горения газа под давлением, а воздух - из окружающего пространства за счет молекулярной или турбулентной диффузии. При этом смешение происходит параллельно с горением, и поэтому скорость самого процесса горения зависит и определяется скоростью смесеобразования.

---



Процесс горения происходит при контакте между газом и воздухом. К струе газа (рис. 1, а) диффундирует воздух, а из струи газа в воздух - газ. Процесс горения происходит в фронте горения, тонком поверхностном слое факела, к которому из внутренней части факела поступает газ, а из топки - воздух.

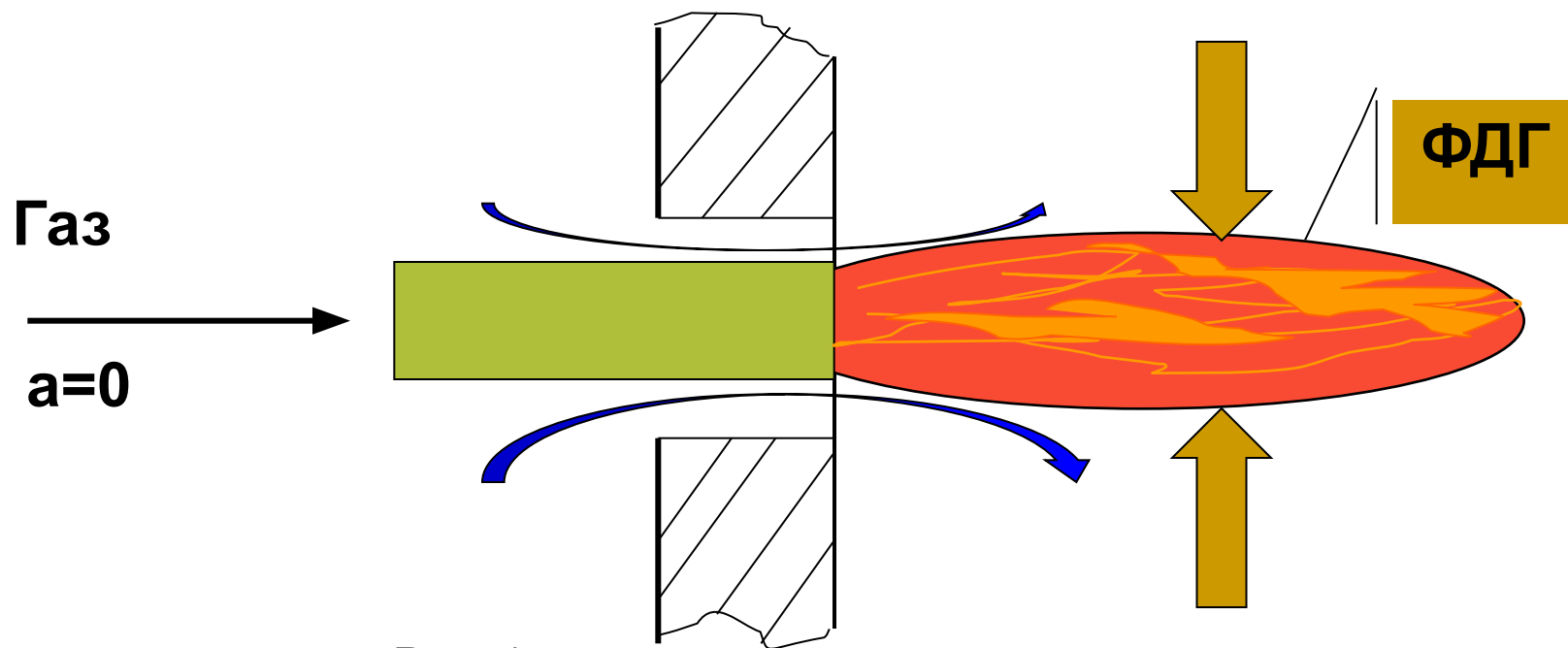


Рис. 1,а



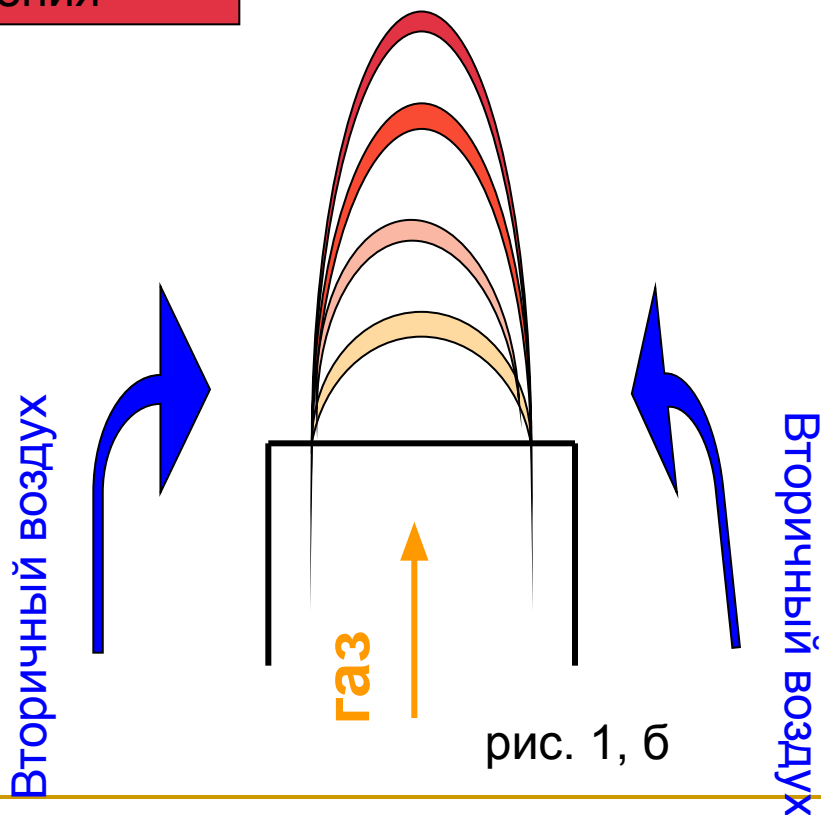
При диффузионном сжигании газа в топку отдельно подаются и газ и воздух где происходит их перемешивание и факел будет иметь вид:

Зона неполного горения

Зона частичного горения

Зона разложения

Зона подогрева



горелка



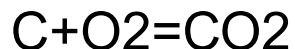
**Факел имеет четыре зоны:**

**1 зона – зона подогрева;**

**2 зона – зона разложения;**

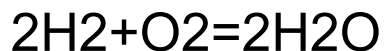


**3 зона - зона частичного горения**



$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$  – неполное горение

**4 зона – зона догорания**





В результате процесса сжигания выделяются продукты сгорания, которые в свою очередь осложняют взаимную диффузию газа и воздуха и горение протекает медленно с образованием частиц сажи.

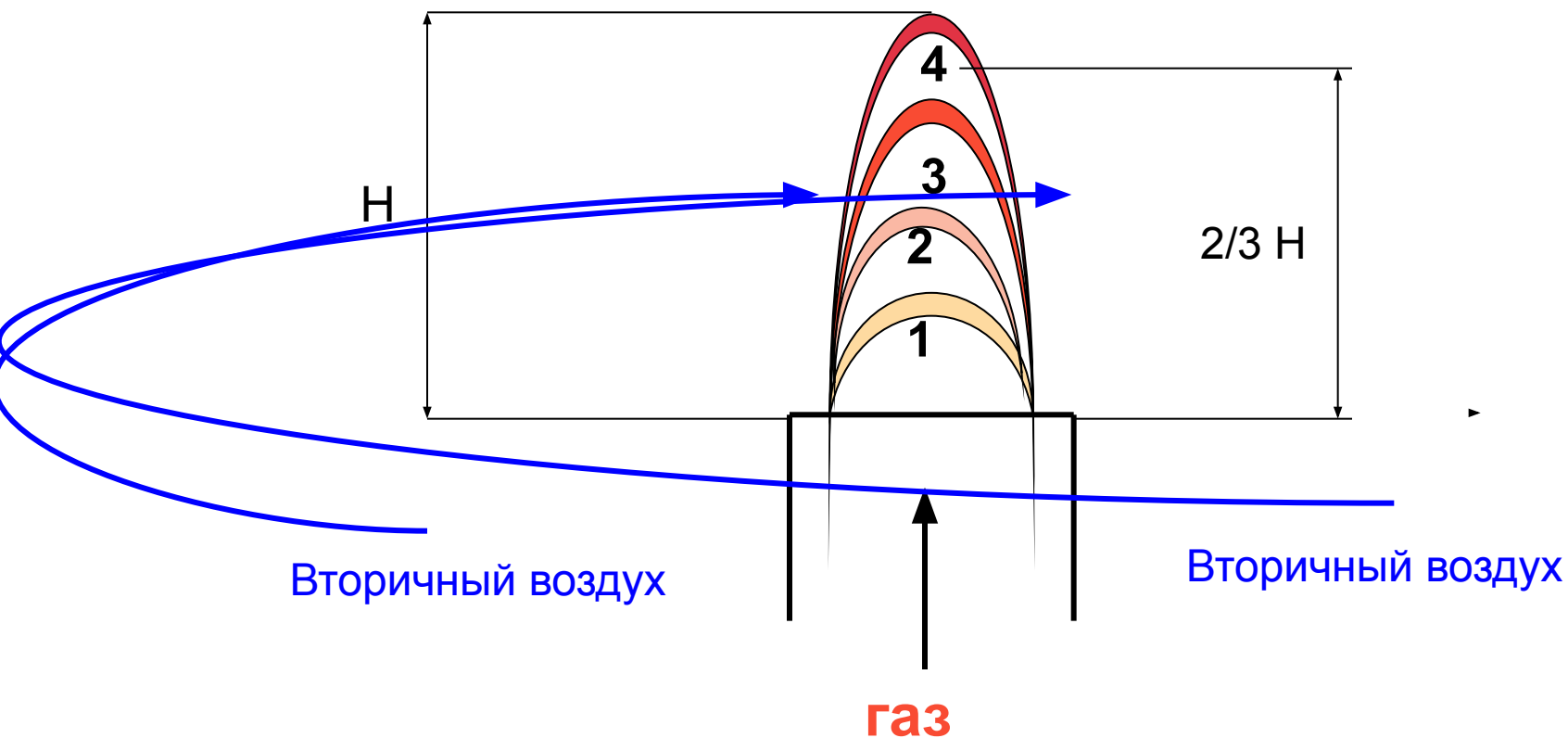
Поэтому диффузионное горение можно охарактеризовать как достаточно длинное и светящееся пламя.

Положительным моментом диффузионного метода сжигания газа является возможность контролировать весь процесс горения в полном объеме.

Процессом смесеобразования легко управлять при применении специальных регулировочных устройств. Дроблением струи газа на отдельные факелы, изменением диаметра сопла горелки, регулированием давления газа и т. д. можно регулировать площадь и длину факела.

---





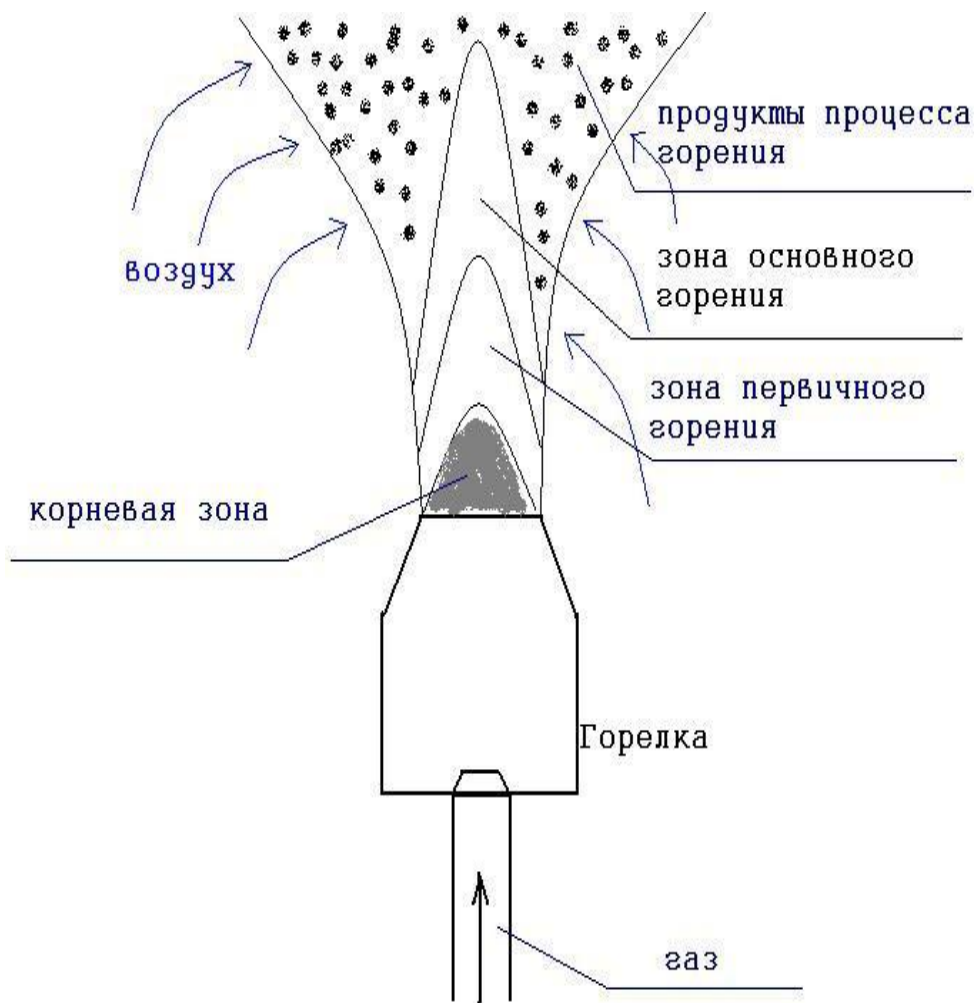
Температура факела по наружному конусу  $1050^{\circ}\text{C}$ , а на высоте  $2/3H$  температура максимальна –  $1400^{\circ}\text{C}$ , т. е. перемешивание осуществляется за счёт диффузии.



Сильной стороной диффузионного метода сжигания можно назвать такие его свойства:

- высокая устойчивость пламени при изменении тепловых нагрузок;
- отсутствие проскока пламени из-за отдельной подачи горючего газа и воздуха;
- равномерность температуры по длине пламени.





**К недостаткам диффузионного метода сжигания относятся:**

- вероятность термического распада углеводородов;
- потребность в больших топочных объемах;
- низкая интенсивность горения, вероятность неполного сгорания газа;
- явление отрыва факела.



## Диффузионно-кинетический

Осуществляется диффузионно-кинетический метод сжиганием факела, который имеет два фронта горения (рис. 2, в и г): кинетический, в виде голубого прозрачного конуса, и диффузионный, в котором происходит догорание топлива, факел при этом прозрачный бледно-голубого цвета.

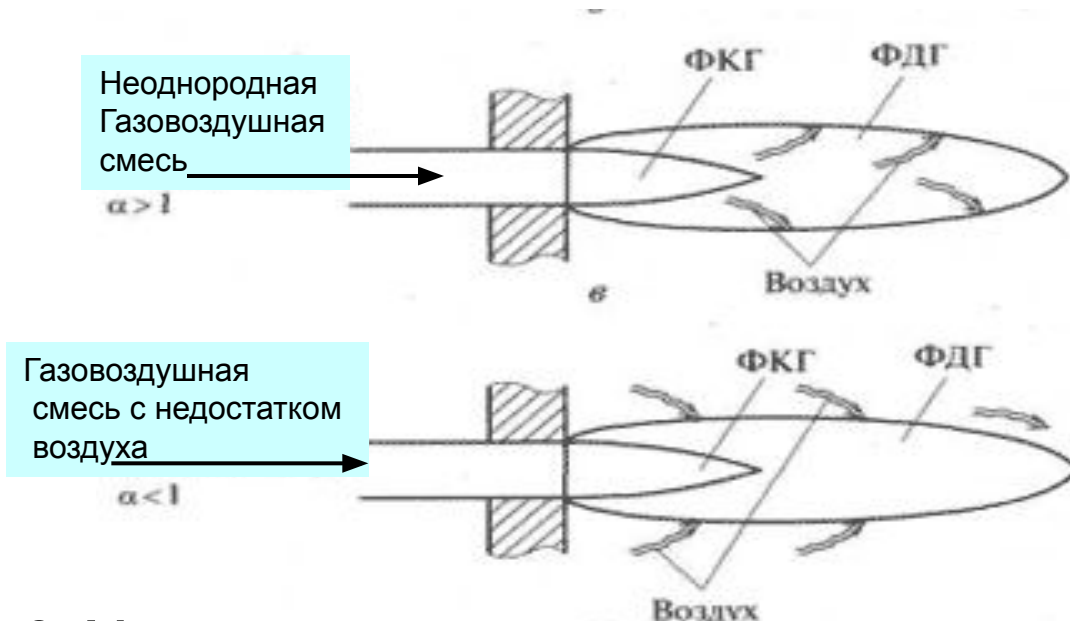
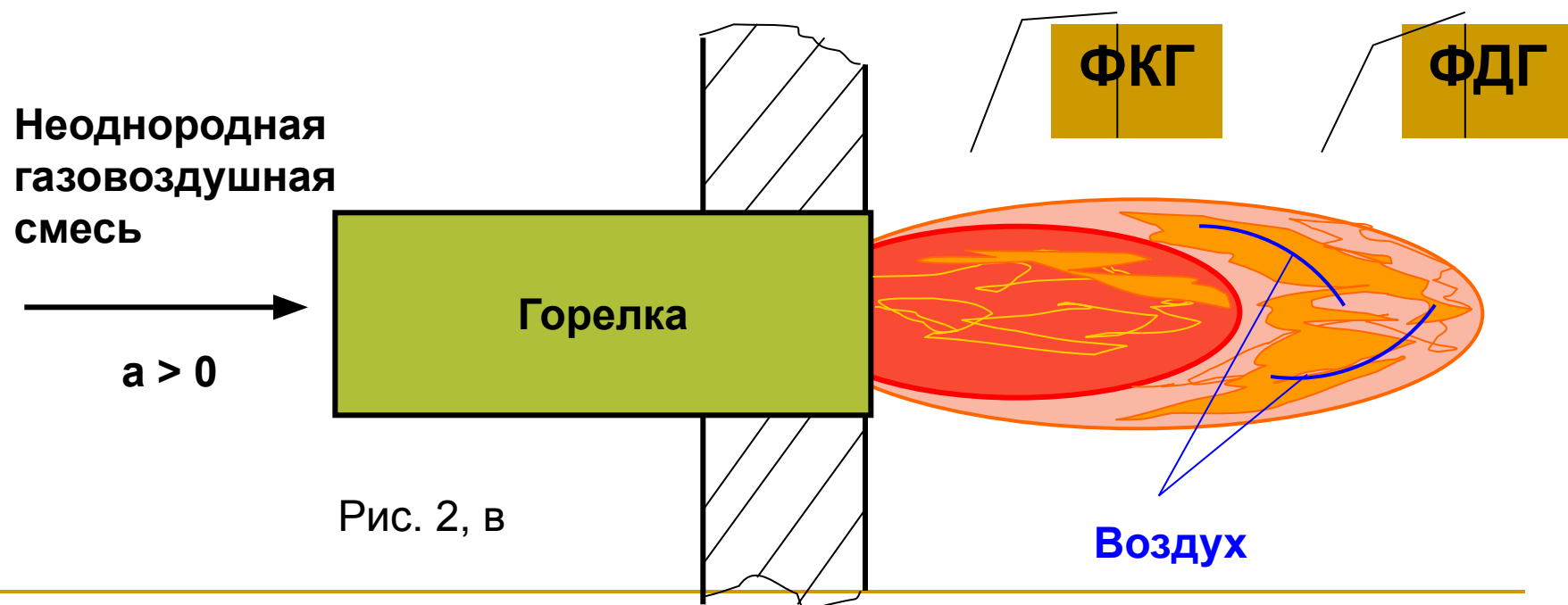


Рис. 2. Методы сжигания газа:

в - диффузионно-кинетический в горелках с неполным предварительным смешением; г - диффузионно-кинетический в горелках с частичным предварительным смешением

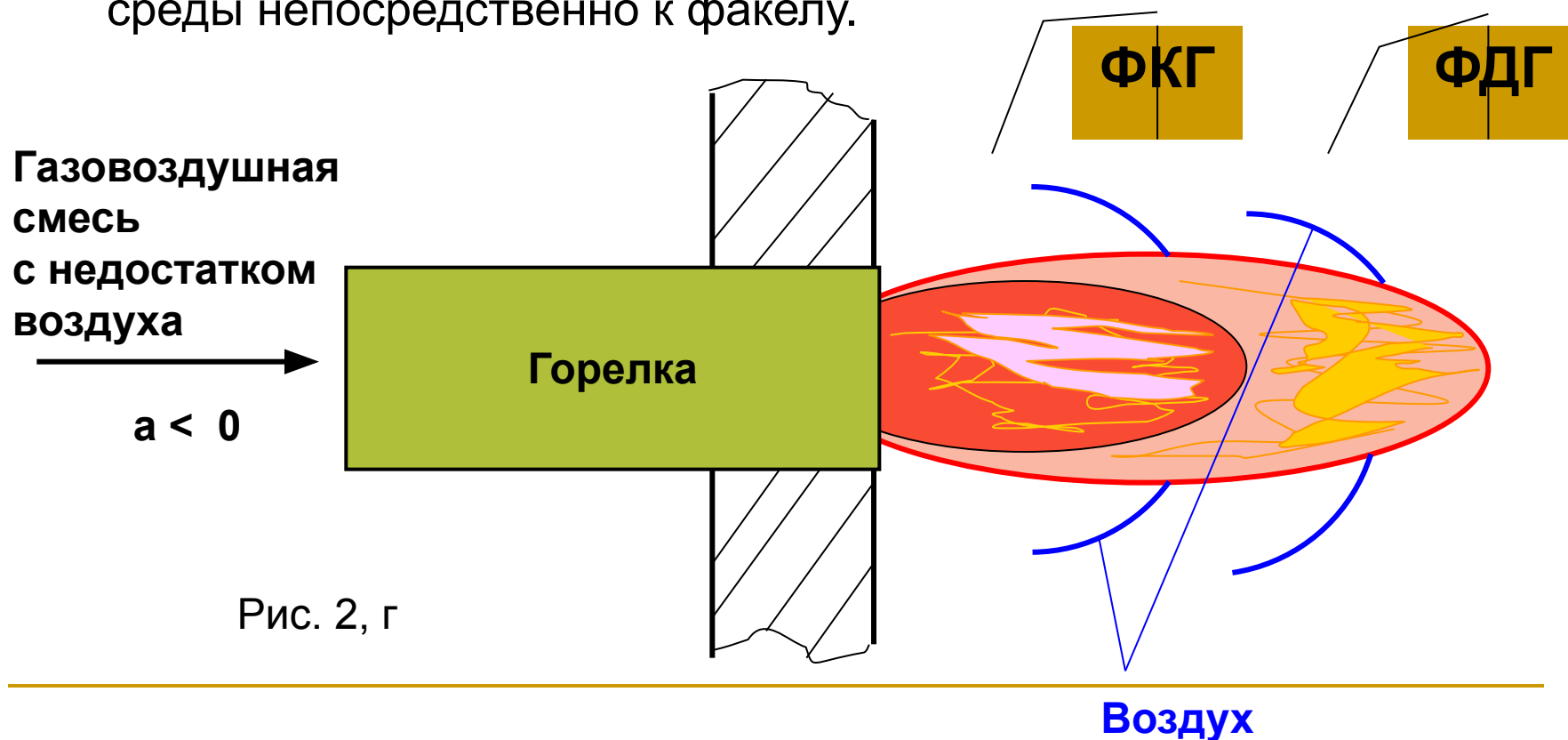


В горелках, имеющих неполное предварительное смешение (рис. 2, в) воздух продвигается в полном объеме, из горелки выходит плохо перемешанная неоднородная газозвудушная смесь, а воздух к диффузионному фронту горения поступает из внутренней части факела.





Частичное предварительное смешение (рис. 2, г) горелки создает условия для предварительного смешения газа только с частью воздуха (30-70)%, необходимого для полного сгорания газа, а остальной воздух поступает из окружающей среды непосредственно к факелу.





В этом случае сначала выгорает во фронте кинетического горения лишь часть газа, смешанная с первичным воздухом, а оставшаяся часть газа, разбавленная продуктами сгорания, выгорает после присоединения кислорода вторичного воздуха из топки во фронте диффузионного горения (ФДГ).



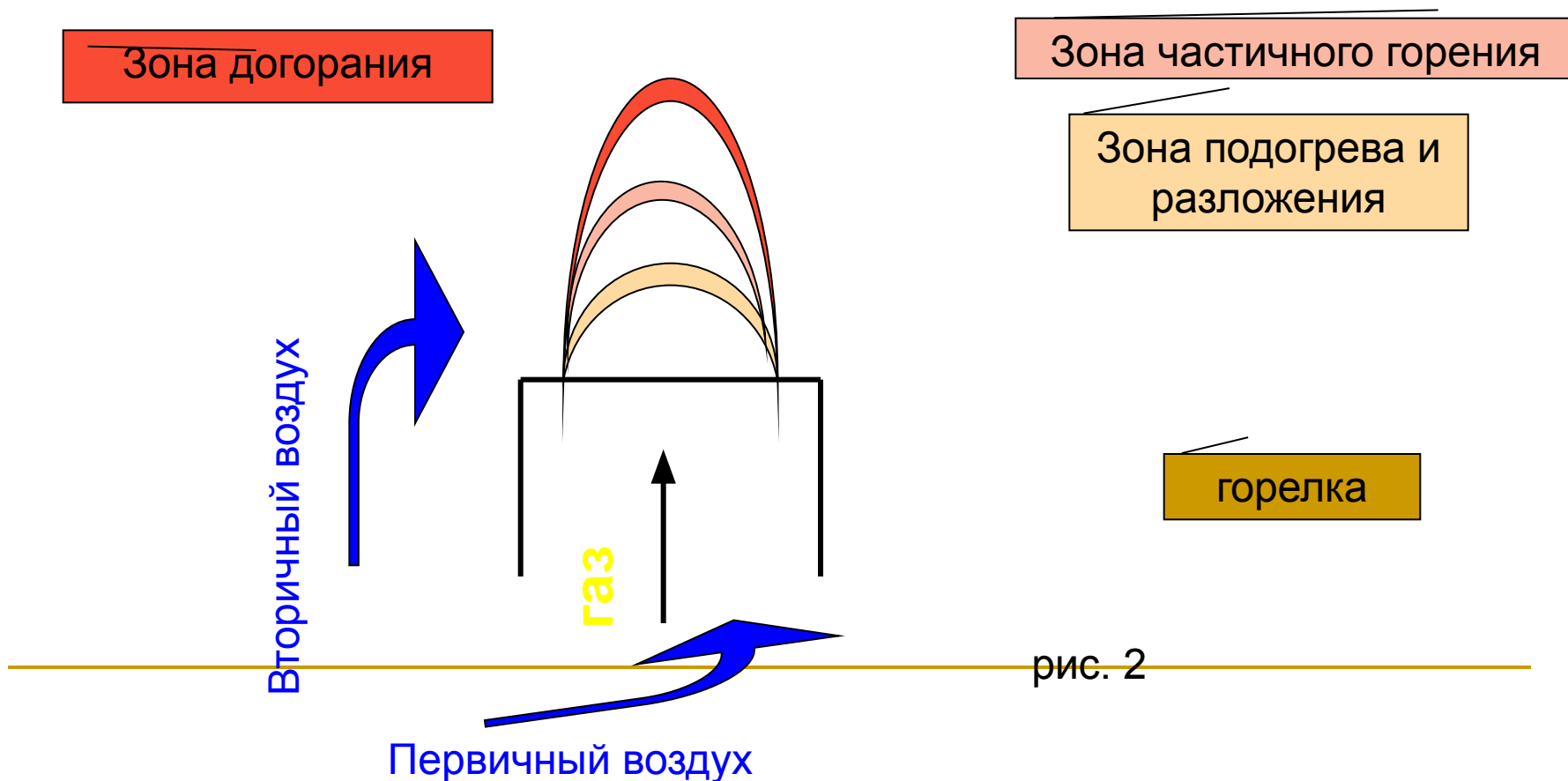


**Факел имеет три зоны:**

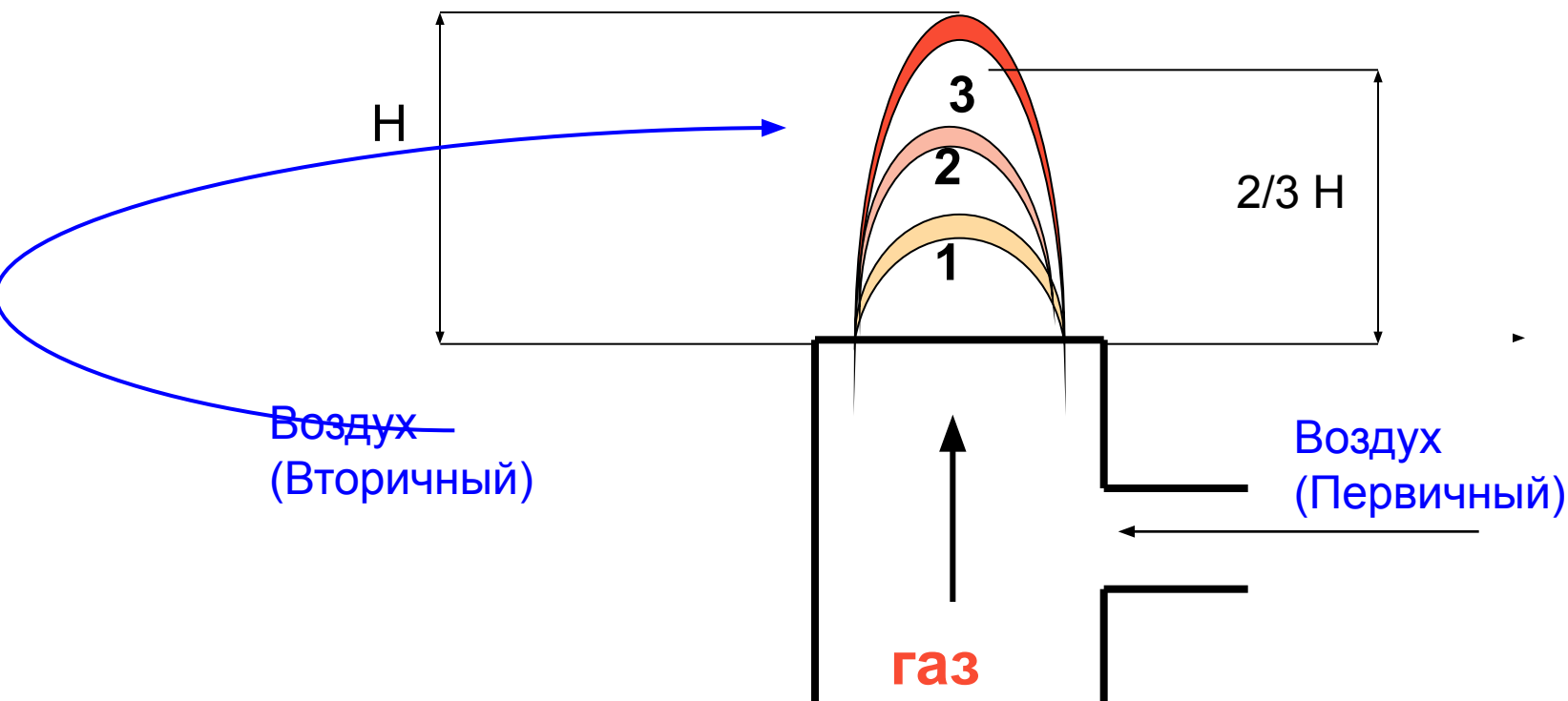
**1 зона – зона подогрева и разложения;**

**2 зона – зона частичного горения;**

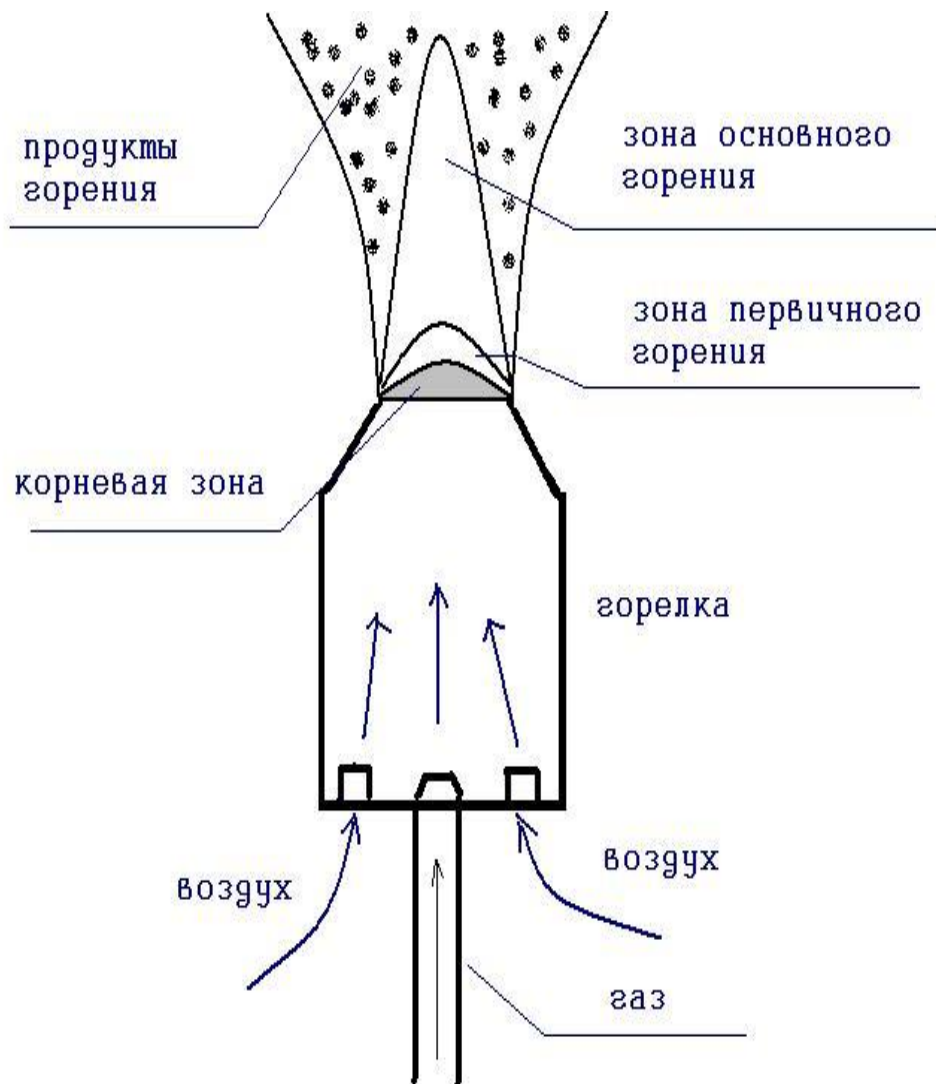
**3 зона - зона догорания**







Температура факела по наружному конусу -  $1400^{\circ}\text{C}$ , а на высоте  $2/3H$  температура максимальна -  $(1600 - 1800)^{\circ}\text{C}$ .



### Оценка диффузионно-кинетического метода:

- длина факела значительно уменьшилась;
- температура факела возросла;
- сохранилось, то что в топку по-прежнему необходимо подавать воздух



## Кинетический способ

КИНЕТИКА (от греч. kinetikos - приводящий в движение)

- 1) раздел теоретической механики, объединяющий статику и динамику.
  - 2) Кинетика физическая - раздел статистической физики, в котором изучаются на основе молекулярно-кинетической теории неравновесные процессы в веществе, например, процессы выравнивания концентраций в смесях (диффузия), температур (теплопроводность) и т.д.
-



Кинетический метод сжигания (рис. 3, б) характеризуется тем, что к месту горения подается полностью подготовленная внутри горелки газовоздушная смесь, сгорая в коротком факеле голубым прозрачным конусом. Таким образом, сгорание топлива осуществляется на поверхности этого конуса, который и называется фронт кинетического горения.

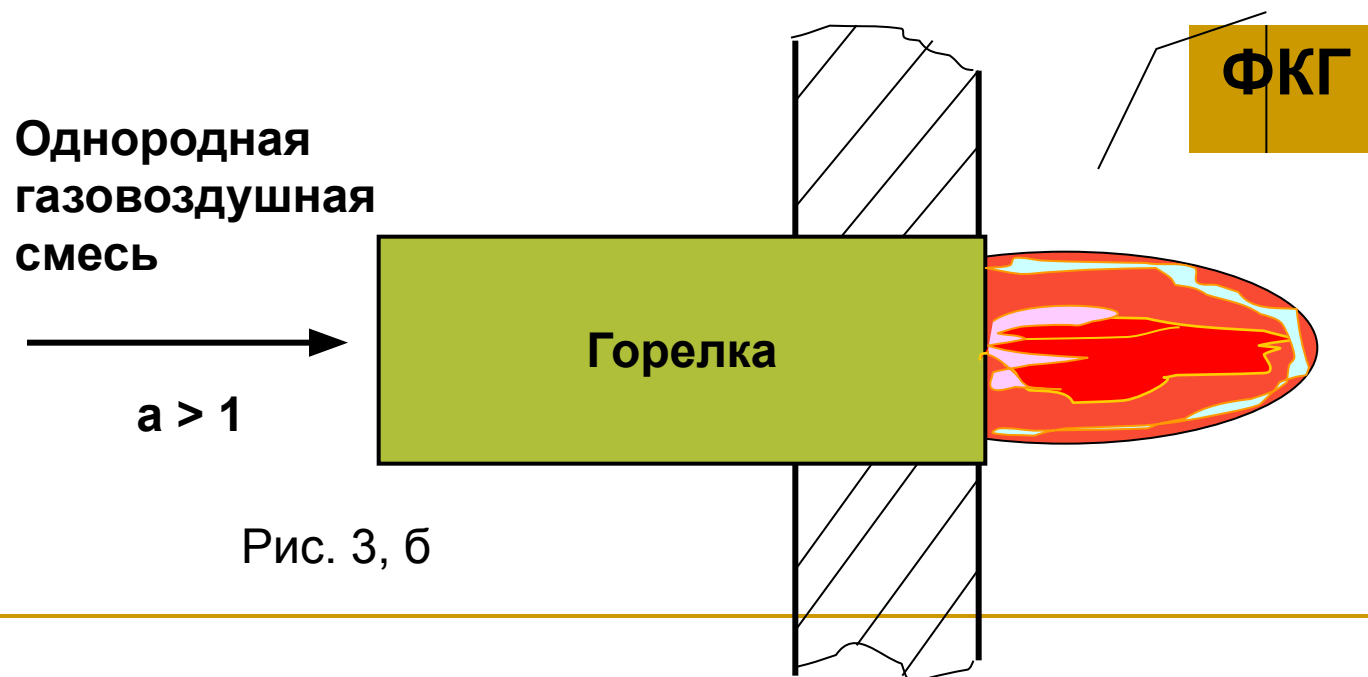


Рис. 3, б



**Факел имеет две зоны:**

**1 зона – зона подогрева и разложения;**

**2 зона – зона полного горения;**

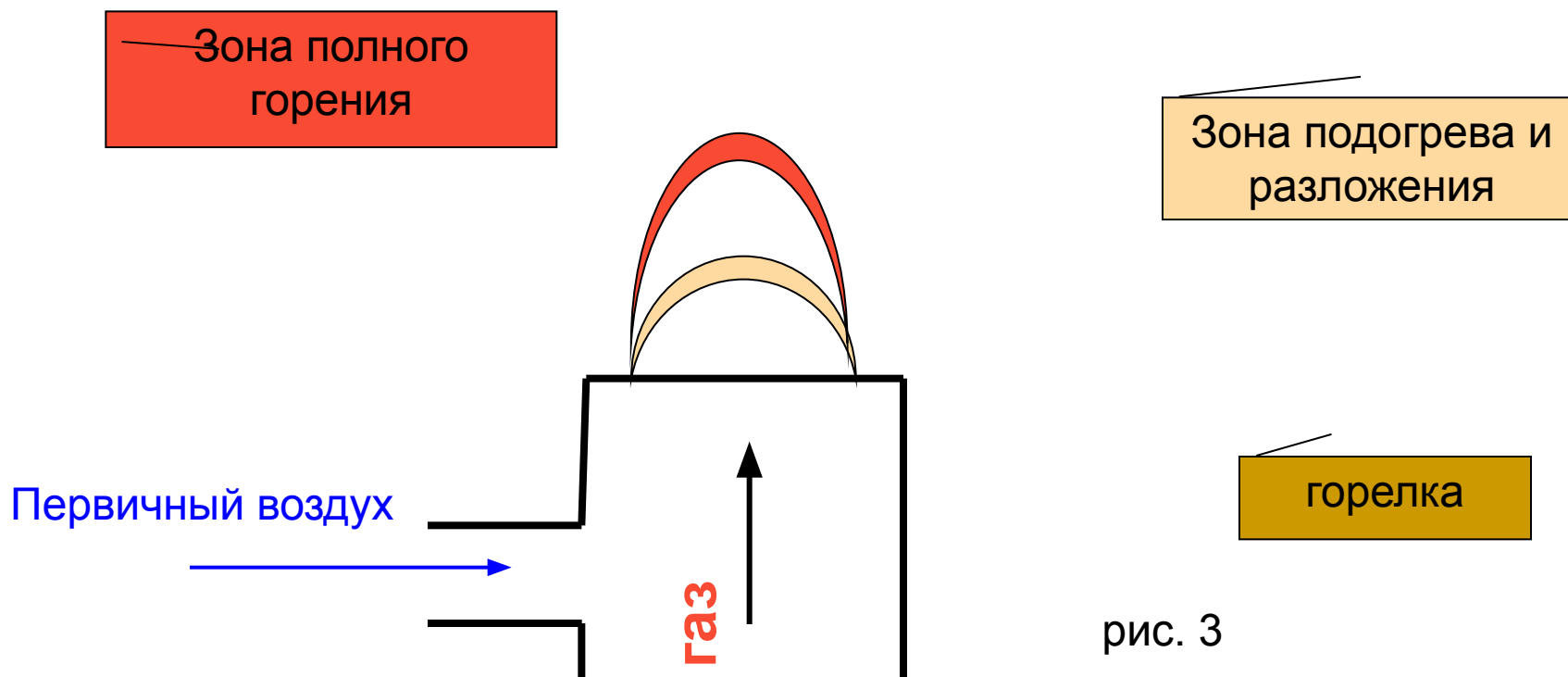
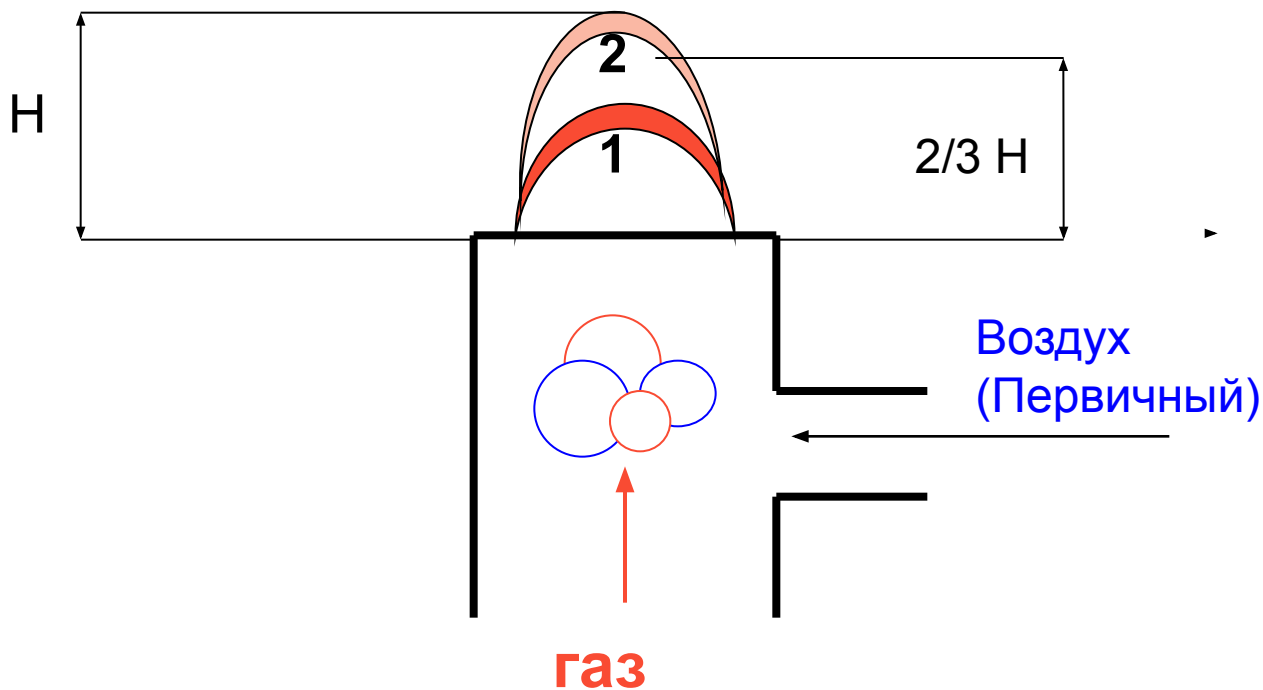


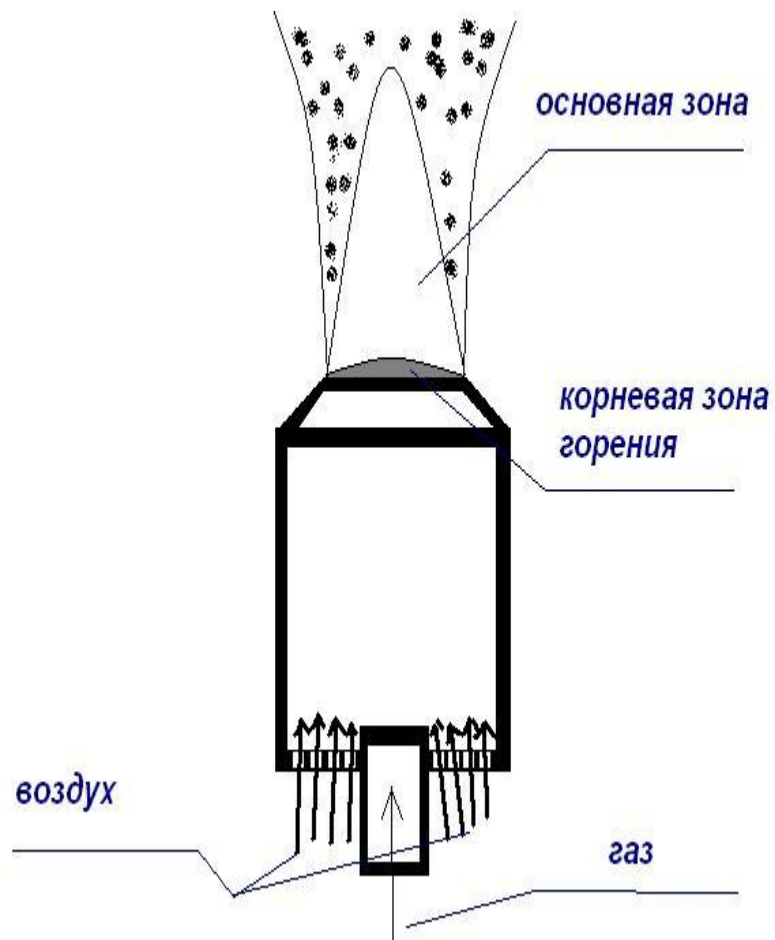
рис. 3



При кинетическом способе сжигания в топку подаётся предварительно перемешанная 100% газовоздушная смесь.



Температура факела максимальна и близка к теоретической –  $2000^{\circ}\text{C}$  .



### Оценка кинетического метода

- факел очень короткий практически и не видно его;
- температура очень высокая;
- но есть и недостаток – необходимо подавать 100% воздуха, а это расход электроэнергии.



Таким образом, к условиям интенсификации сжигания газов относятся:

предварительный подогрев воздуха, идущего на горение, и газообразного 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 газозадушной смеси из горелок;

организация зажигания по развитому периметру для получения соответственно развитой поверхности воспламенения и горения;

интенсификация выгорания путем усиления тепло- и массообмена в зоне дожигания.

---





## Перечень контрольных вопросов

1. Дать определение, что такое горение.
  2. Условия полного сгорания топлива.
  3. Что такое коэффициент избытка воздуха?
  4. Проскок пламени.
  5. Отрыв пламени.
  6. Теплота сгорания топлива.
  7. Дать определение, что такое концентрационные пределы воспламенения (взрыва) горючих газов с воздухом.
  8. Диффузионный метод сжигания (преимущества и недостатки)
  9. Диффузионно-кинетический метод сжигания (преимущества и недостатки).
  10. Кинетический метод сжигания топлива (преимущества и недостатки).
-