

# Простирање пламена у турбулентној струји



Турбулентно струјање:

- процес је интензивнији
- брзина простирања пламена је знатно већа.

Фронт пламена:

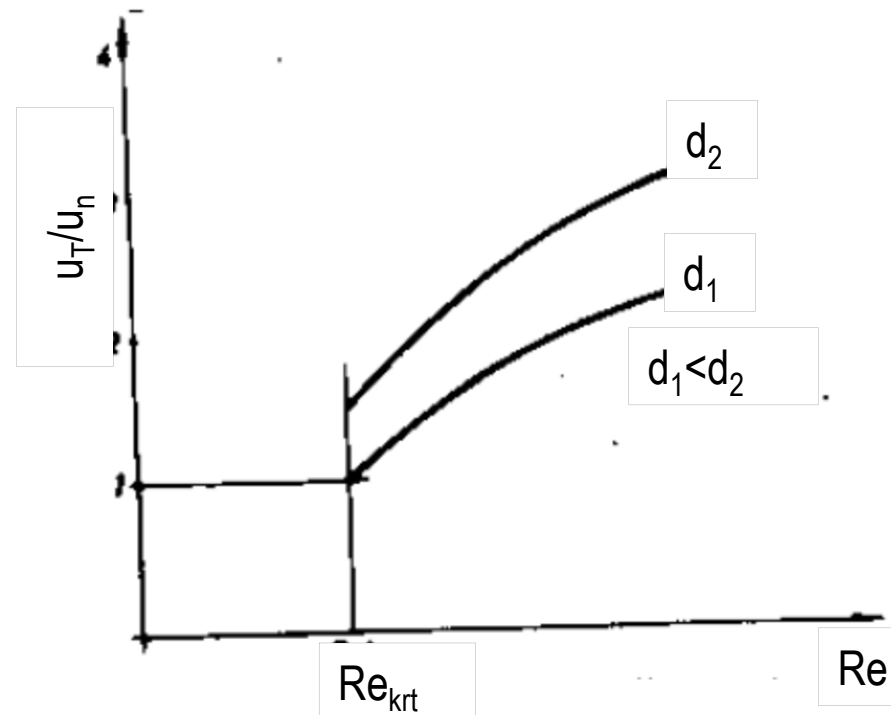
- ламинарни режим - једна глатка равна површина
- турбулентни режим - фронт пламена се мање или више повија и разбија у већи број независних сегмената (у зависности од степена турбуленције).

# Простирање пламена у турбулентној струји

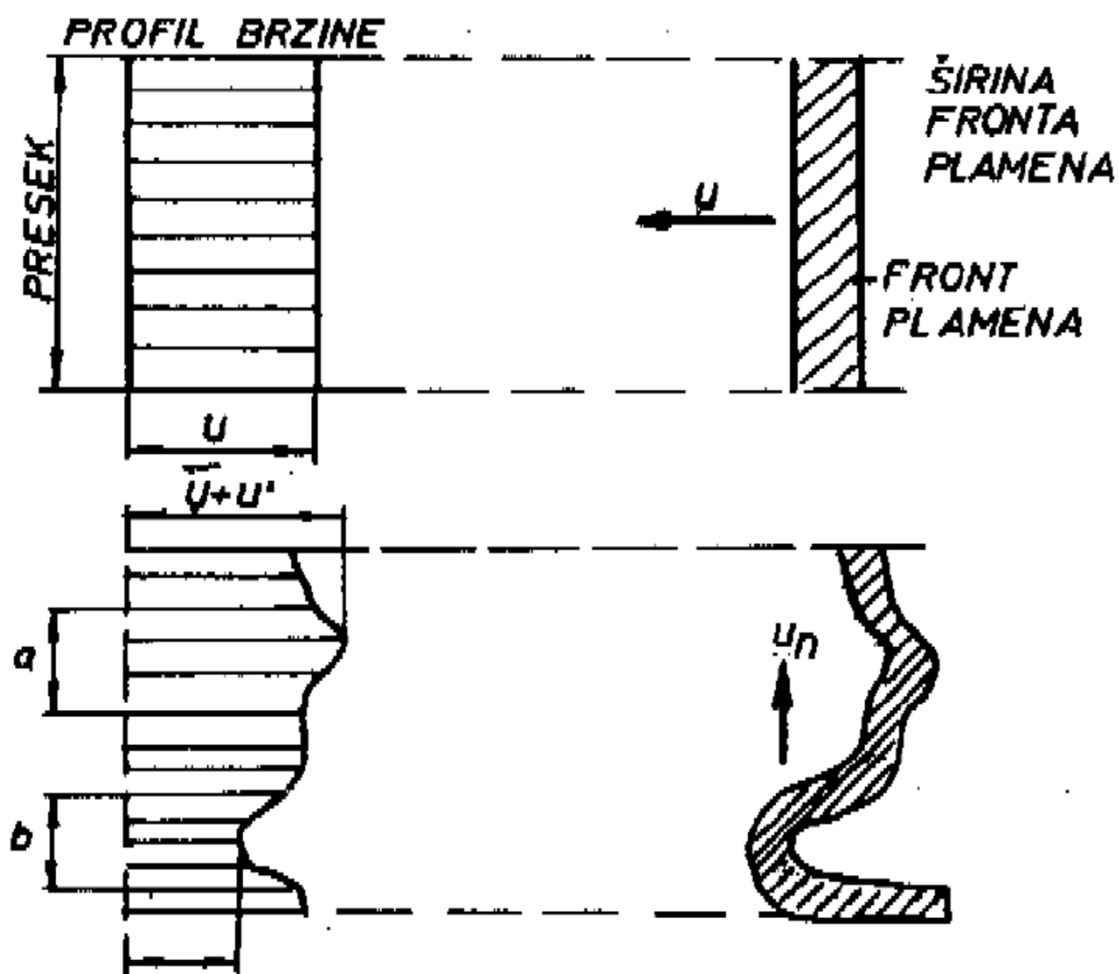


Турбулентни режим:

- размена топлоте се одвија кроз премештај читавих елементарних запремина
- брзина простирања пламена је значајно већа.



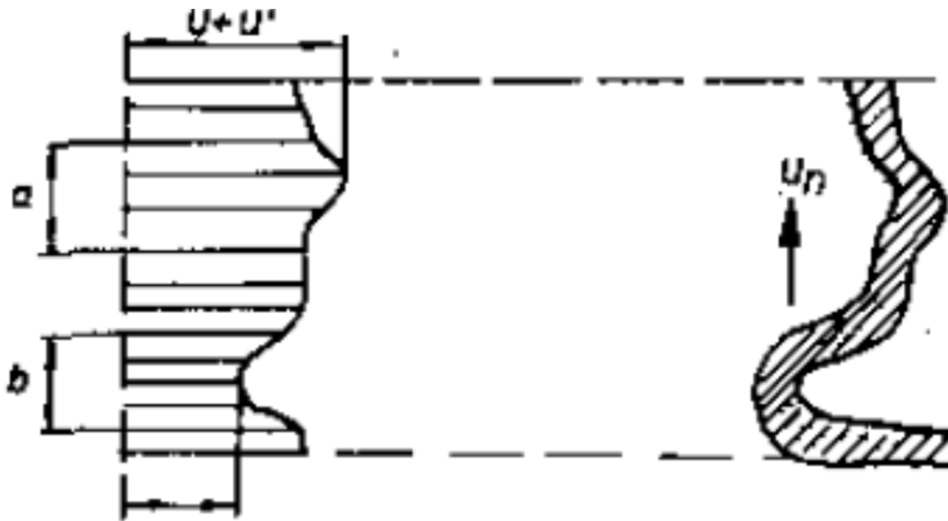
# Простирање пламена у турбулентној струји



При ламинарном струјању фронт пламена је раван и остаје стационаран ако је брзина гаса једнака брзини сагоревања.

У зависности од степена турбуленције фронт пламена се мање или више повија или се разбија у већи број независних сегмената.

# Простирање пламена у турбулентној струји



Турбулентан пламен је стационаран ако се:

- брзина струјања повећава у сразмери са турбулентном брзином сагоревања ( $u_T$ )
- средња брзина струјања ( $\bar{u}$ ) изједначи са брзином сагоревања ( $u_T$ )

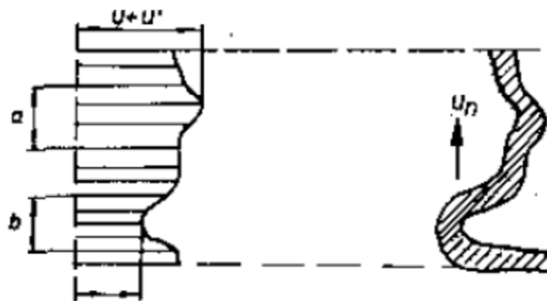
Површина фронта пламена је пропорционална флукуацији брзине  $\pm u$ .

- Тренутна брзина ( $u$ ) једнака је збиру средње брзине ( $\bar{u}$ ) и пулзационе брзине ( $u'$ ).
- Пулзациона брзина може имати смер супротан смеру струје.
- Површина турбулентног пламена по јединици површине попречног пресека струје је већа од одговарајуће површине ламинарног пламена.

# Простирање пламена у турбулентној струји

## Мала турбуленција:

- утиче на зону реакција – повећан пренос слободних радикала, атома и топлоте
- брзина простирања пламена је већа од брзине простирања ламинарног пламена
- брзина простирања пламена је пропорционална брзини струјања.



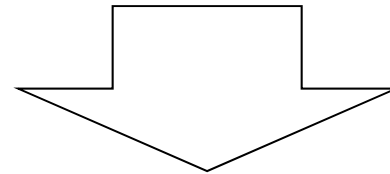
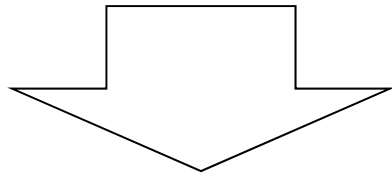
## Велика турбуленција:

- значајно повијање пламена
- повећава се ефективна површина пламена и брзина сагоревања
- доводи до цепања фронта пламена, тако да не постоји континуална зона фронта пламена
- брзина простирања пламена зависи од флукуације гасне струје, а мало зависи од састава смеше.

# Простирање пламена у турбулентној струји

Карактеристичне величине:

- пречник вртлога  $l$
- дебљина фронта пламена  $\delta$

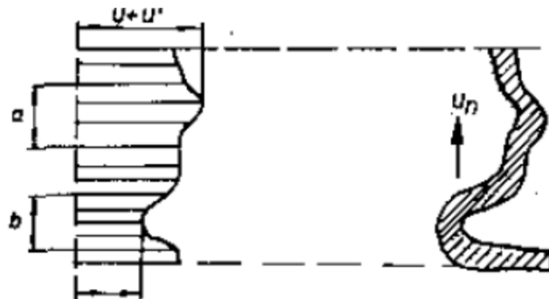


Мала турбуленција:

- $l < \delta$

Велика турбуленција:

- $l > \delta \rightarrow$  цепање фронта пламена

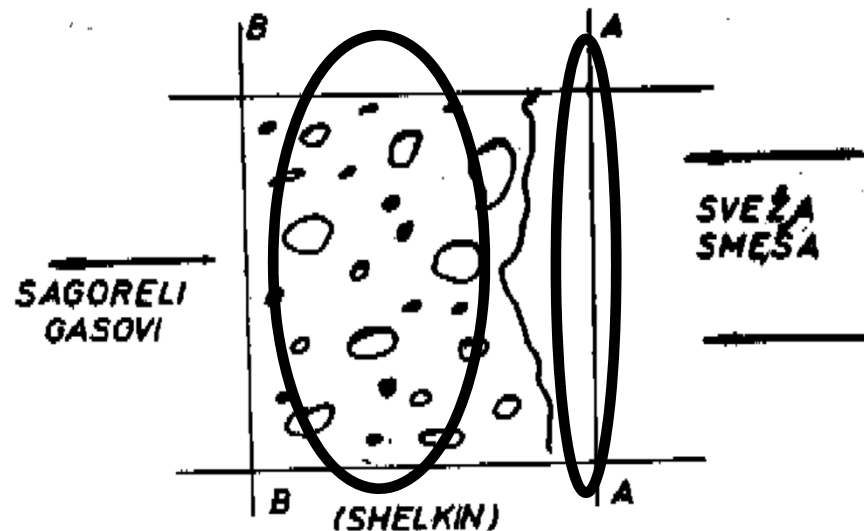


# Простирање пламена у турбулентној струји

Дебљина турбулентног пламена је знатно већа у односу на ламинарни пламен.

Турбуленција се јавља у непосредној близини ламинарног фронта пламена и затим се повећава до максималне вредности. У непосредној близини несагорелог гаса интензитет турбуленције је знатно мањи у односу на интензитет у пламену.

Структура пламена за случај велике турбуленције

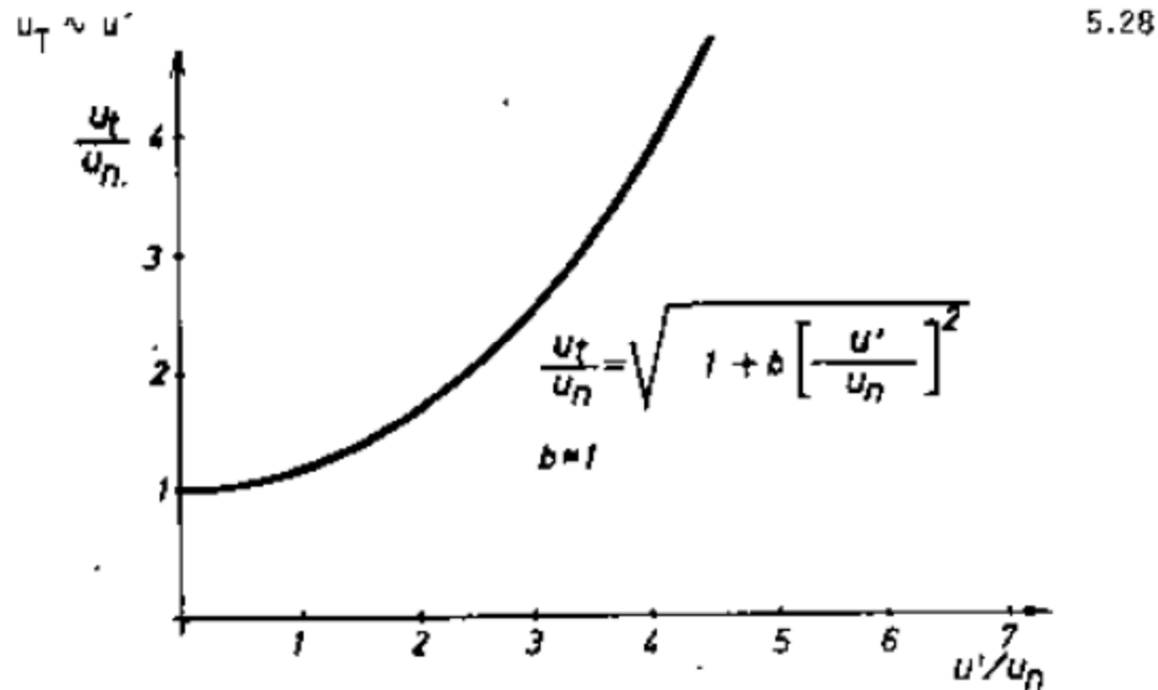


# Простирање пламена у турбулентној струји

За мали интензитет турбуленције ( $l < \delta$ ),  
узима се у обзир и молекуларна  
дифузија

- $l_1$  – елементарни помак честице

# Простирање пламена у турбулентној струји



- Турбулентна брзина сагоревања у зависности од интензитета турбуленције

# Простирање пламена у турбулентној струји

---

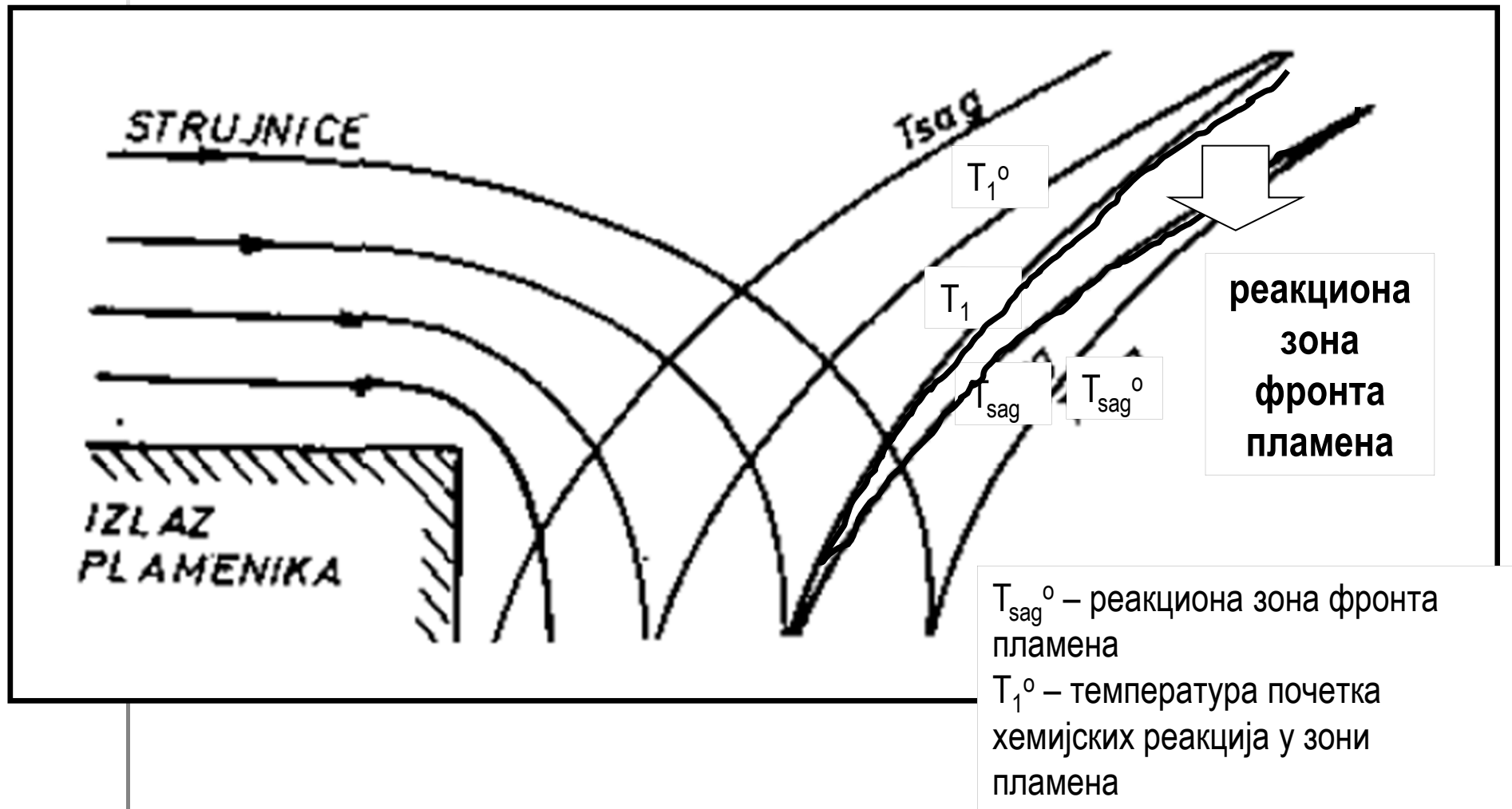
- У случају јако турбулентног пламена већи део кинетичке енергије изазване око ламинарног пламена се трансформише у енергију турбуленције.
- У непосредној близини несагорелог гаса интензитет турбуленције је знатно мањи од неке средње вредности у пламену.

# Струјна стабилизација фронта пламена

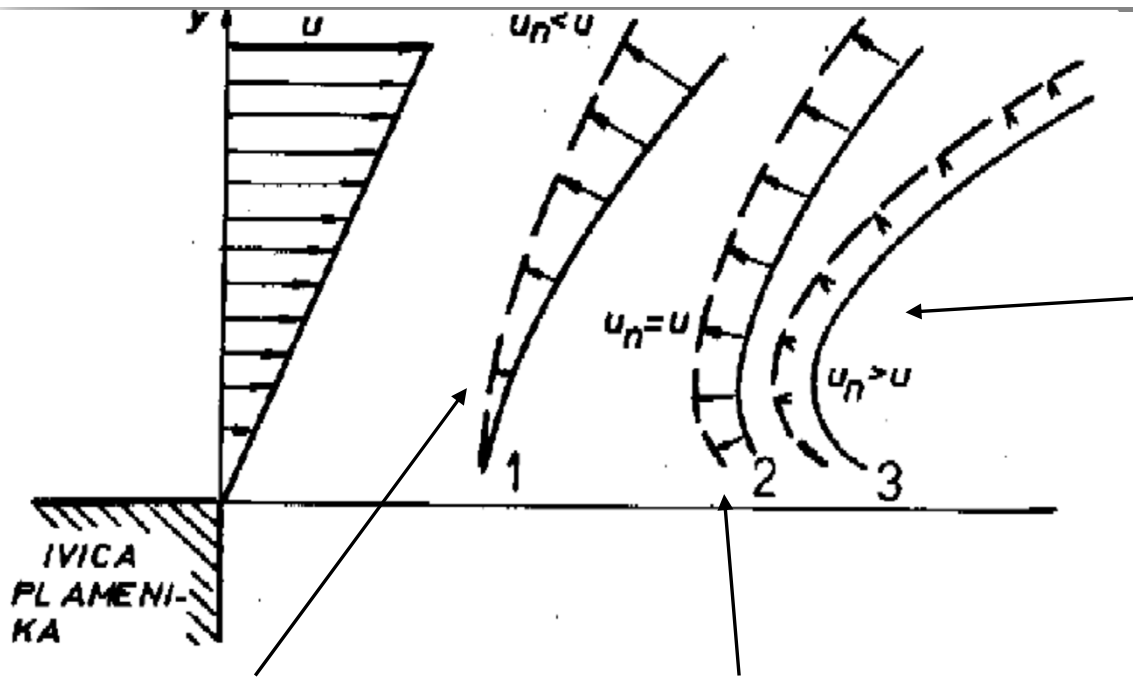
---

- Брзина струјања ( $u$ ) и брзина сагоревања ( $u_n$ ) утичу на положај фронта пламена у односу на излаз из горионика.

# Струјна стабилизација фронта пламена



# Струјна стабилизација фронта пламена

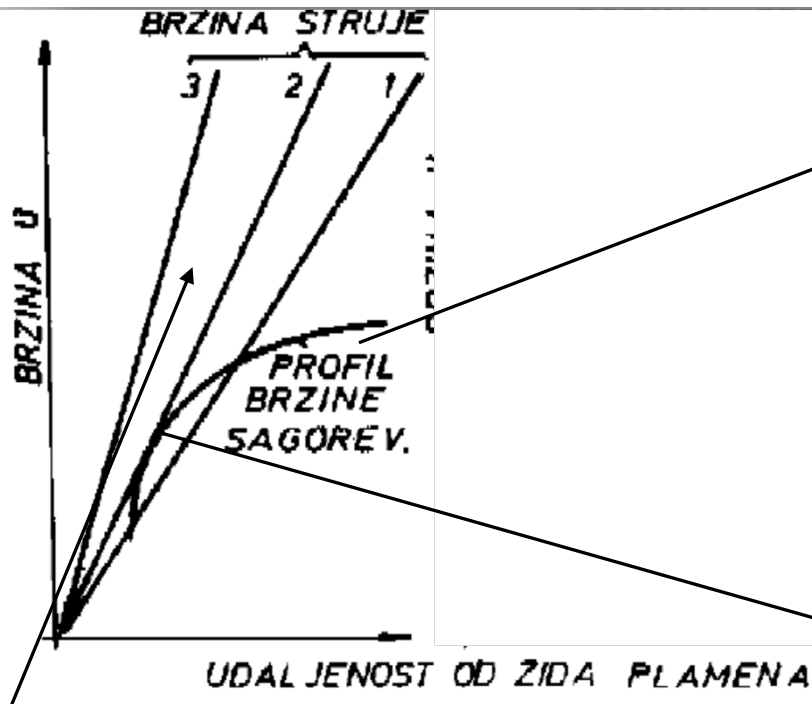


Брзина сагоревања већа од брзине струјања, тако да се пламен повија према равнотежном положају.

Брзина струјања је у свим тачкама већа од брзине сагоревања и фронт пламена се повија уназад под дејством струје гаса

Померање фронта пламена у правцу струјања утиче на смањење губитака топлоте и због тога се повећава брзина сагоревања све док се не изједначи са брзином струјања. Фронт пламена је у равнотежи.

# Струјна стабилизација фронта пламена

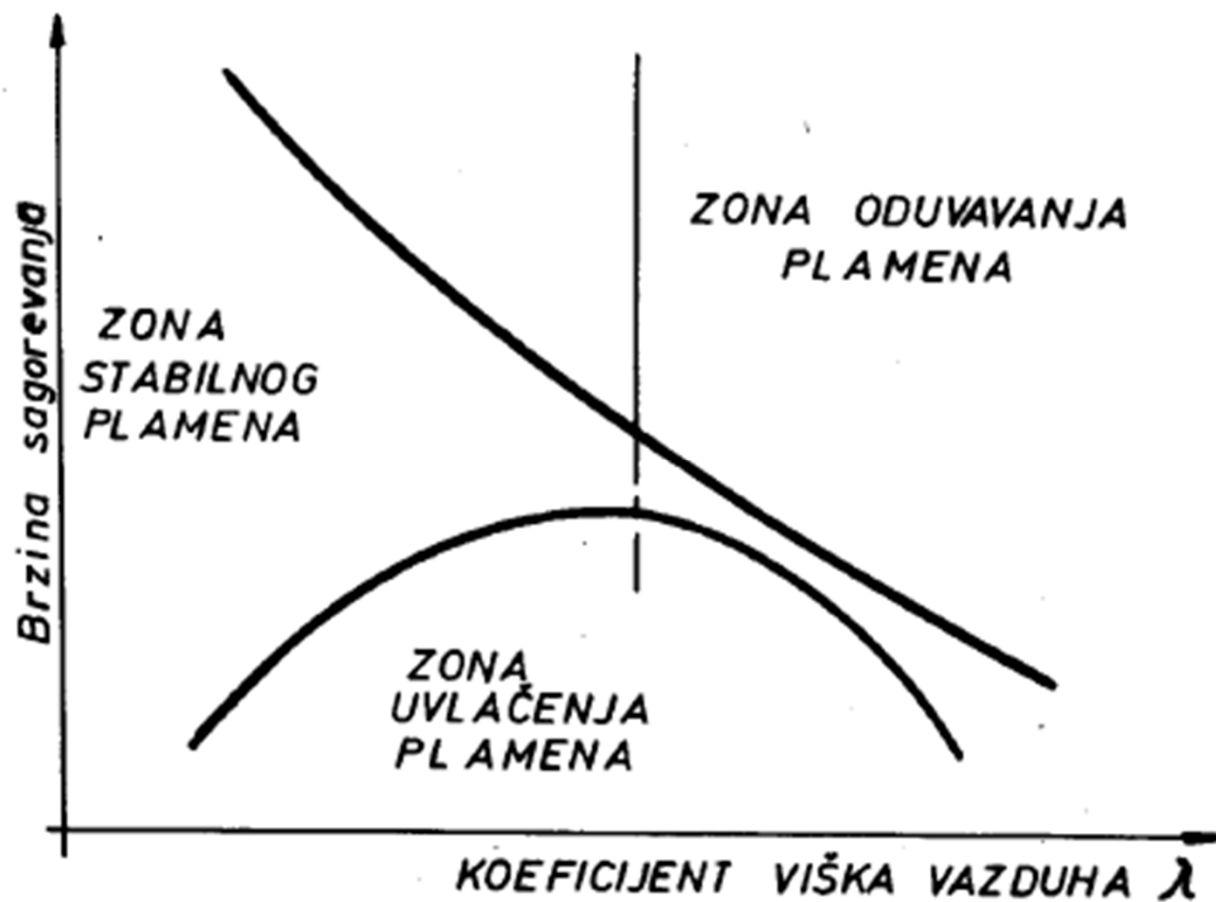


Брзина сагоревања је већа од брзине струјања, фронт пламена се враћа унатраг – увлачење фронта пламена

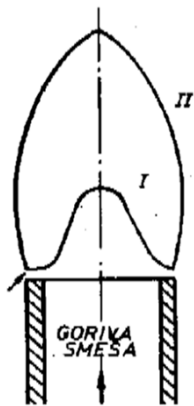
Гранично стање, профил брзине сагоревања тангира криву брзине струјања

Брзина струјања је већа од брзине сагоревања и фронт пламена се помера у даљину. Стабилно сагоревање. Са повећањем брзине струјања, фронт пламена се удаљава све до критичне вредности брзине струјања када долази до одувавања пламена.

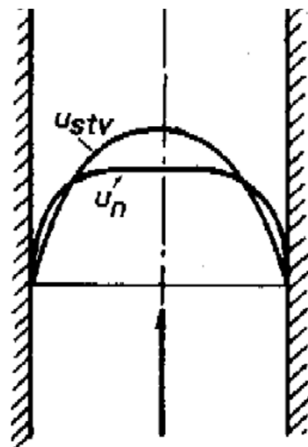
# Стабилизација фронта пламена



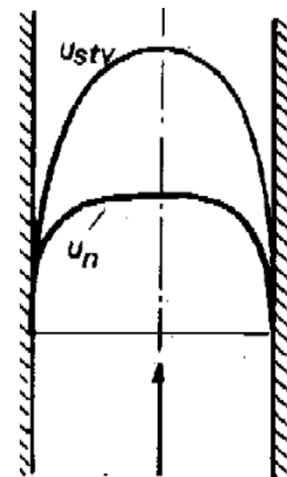
# Фронт пламена



Профил пламена на излазу из горионика



Увлачење пламена



Одувавање пламена

---

# **Сагоревање гасовитих горива**

# Степен сагоревања - утицајни параметри

---

- Састав смеше
- Брзина струјања смеше
- Хомогеност смеше
- Почетна температура горива и ваздуха
- Присуство инертних компоненти у смеши
- Топлотни губици
- Начин припаљивања смеше
- Специфичности ложишта и фронта пламена
- Температура сагоревања у ложишту

# Време сагоревања гасовитог горива

- Време потребно за образовање смеше
- Време потребно да се смеша загреје до температуре паљења
- Време потребно за одвијање хемијских реакција

$$t_{sag} = t_m + t_{pr} + t_{HR}$$

$$t_{sag} = t'_m + t_{HR}$$

$$t_{sag} : t_m$$

# Сагоревање гасовитих горива

---

- У дифузионој области (дифузионо сагоревање)
- У кинетичкој области (кинетичко сагоревање)
- У прелазној области (комбиновано сагоревање)

# Начини увођења гаса и ваздуха

---

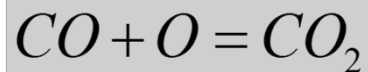
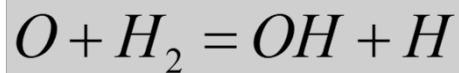
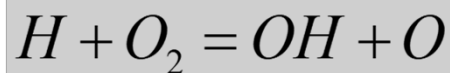
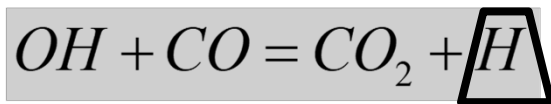
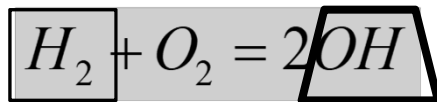
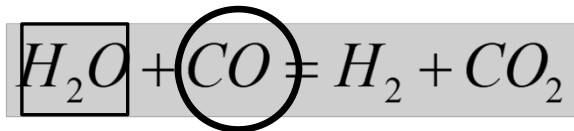
- Паралелна струја гаса и ваздуха, угао сусретања струја  $0^\circ$ .
- Попречна струја гаса или ваздуха на другу струју, угао сусрета струја од  $30$  до  $90^\circ$ .
- Супротносмерно струјање гаса и ваздуха, угао сусрета  $180^\circ$ .

# Сагоревање гасовитих горива

---

- Брзина сагоревања гасовитих горива је велика услед дејства молекуларне и турбулентне дифузије – скраћују се фаза мешања и предгревања гориве смеше.
- Ланчане реакције се одвијају брзо због високих концентрација и температура.
- У горивој смеси јављају се водоник, угљен моноксид, метан и други угљоводоници.

# Сагоревање угљен монооксида



Присуство водене паре и водоника игра значајну улогу у процесу сагоревања угљен монооксида, јер обезбеђује формирање носилаца реакције (ОН и Н), који су услов за даљи ток реакције

# Сагоревање угљоводоника

---

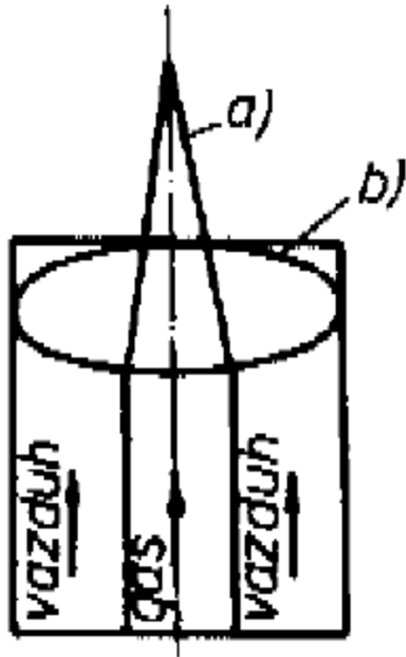
- Сагоревање угљоводоника се одвија кроз читав низ сложених ланчаних реакција.
- Карактеристично је да ове реакције имају дугачак период индукције – почетне реакције су споре и пораст температуре је спор.

# Дифузионо сагоревање

---

- Процес где се припрема гориве смеше одвија непосредно у зони одвијања процеса сагоревања.
- Најпростији горионик је концентрични цевни горионик кроз који се одвојено доводе гасовито гориво и ваздух; гориво се доводи кроз горионик малог пречника у ваздух који струји кроз концентричну цев већег пречника.
- У зависности од режима струјања образује се ламинарни или турбулентни пламен.
- Основни феномен је молекуларна дифузија која се јавља услед разлика у концентрацијама на граници између зоне горива (гаса) и оксидатора (ваздуха).

# Дифузионо сагоревање у ламинарној струји

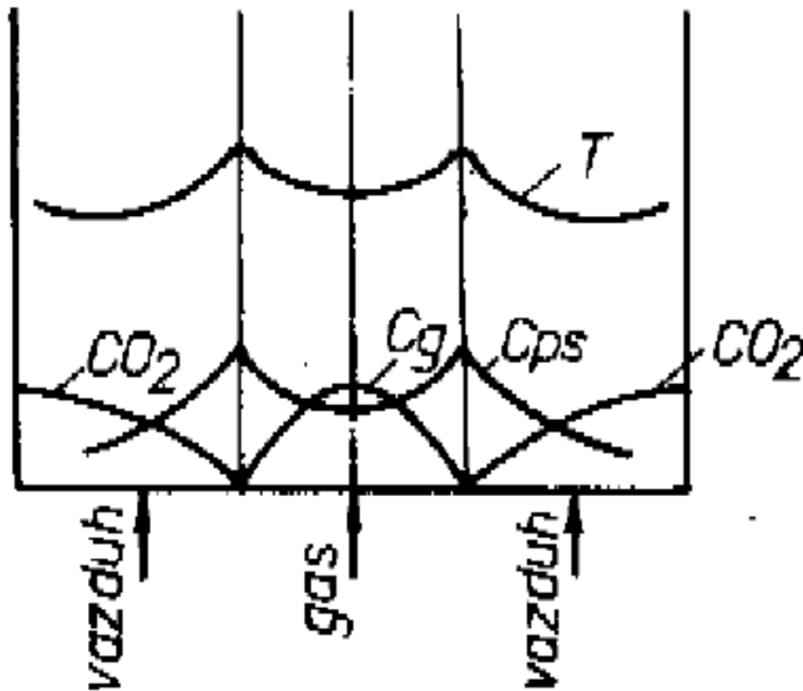


Количина ваздуха већа од  
количине потребне за  
сагоревање горива (случај а).

Пламен је издужен по оси  
горионика.

Већа количина горива (случај  
б), ширина пламена се  
повећава.

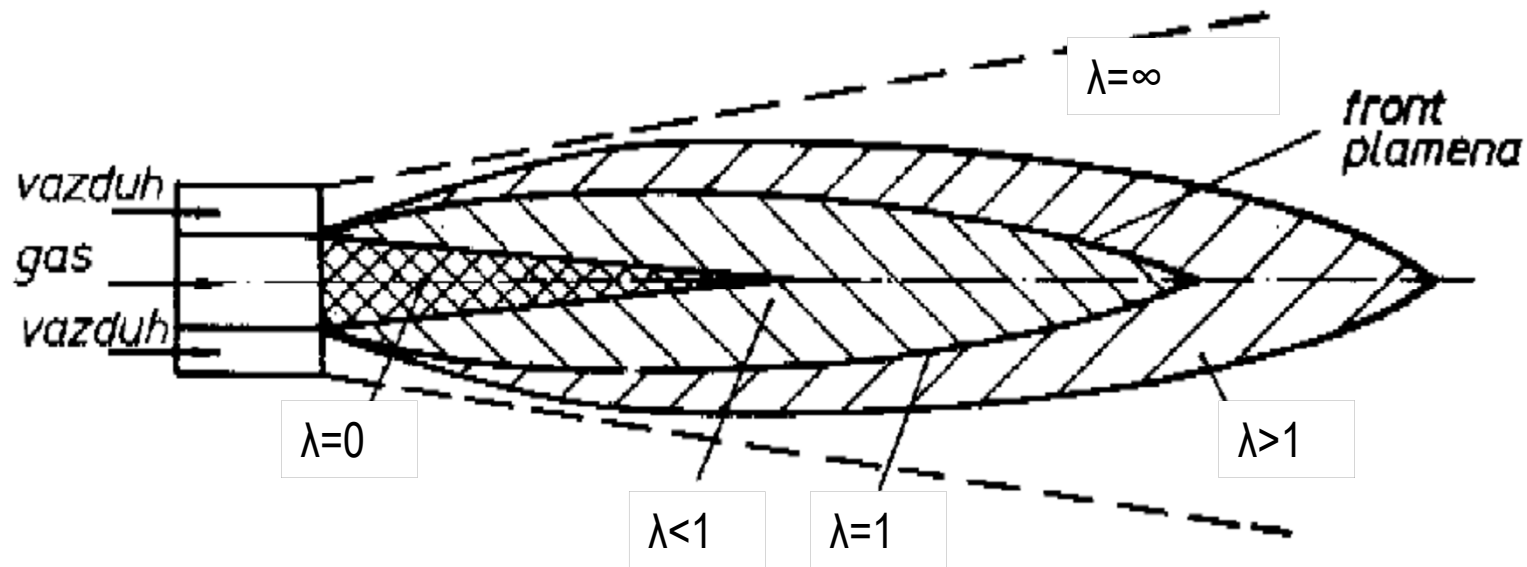
# Дифузионо сагоревање у ламинарној струји



Расподела појединих  
величина процеса  
сагоревања (случај б).

Концентрација горива  
је највећа по уздужној  
оси пламена и смањује  
се према границама  
контуре пламена.

# Анализа структуре ламинарног пламена



$\lambda<1$

Дифузија горива према спољним зонама, фронт пламена се помера напред

$\lambda=1$

Стехиометријска смеша, фронт пламена се стабилизује на овој граници

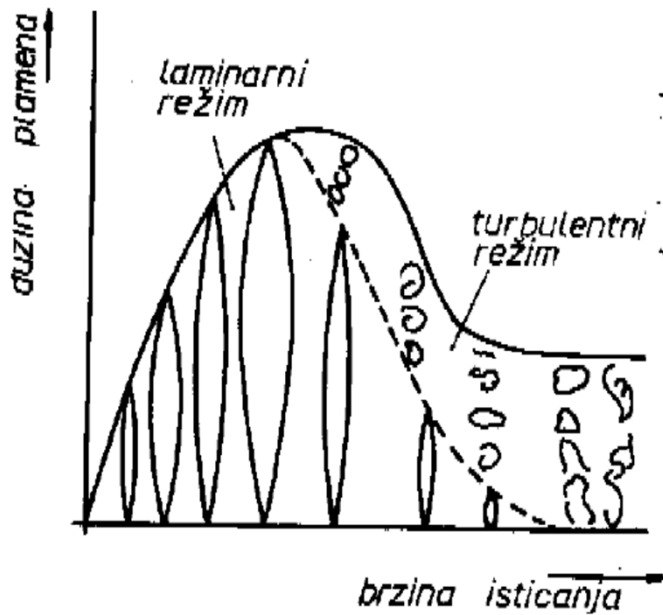
$\lambda>1$

Вишак оксидатора, не може се одржати стабилан пламен

# Дужина ламинарног дифузионог пламена

$$L : \frac{d^2 U}{D}$$

$$L : d^2 U$$



Коефицијент молекуларне дифузије не зависи од димензија горионика и брзине, па је дужина дифузионог пламена пропорционална квадрату пречника горионика и брзине истицања.

Регулисање дужине дифузионог пламена заменом одређеног пречника горионика са већим бројем горионика мањег пречника – у граничном случају добија се тзв. беспламено сагоревање

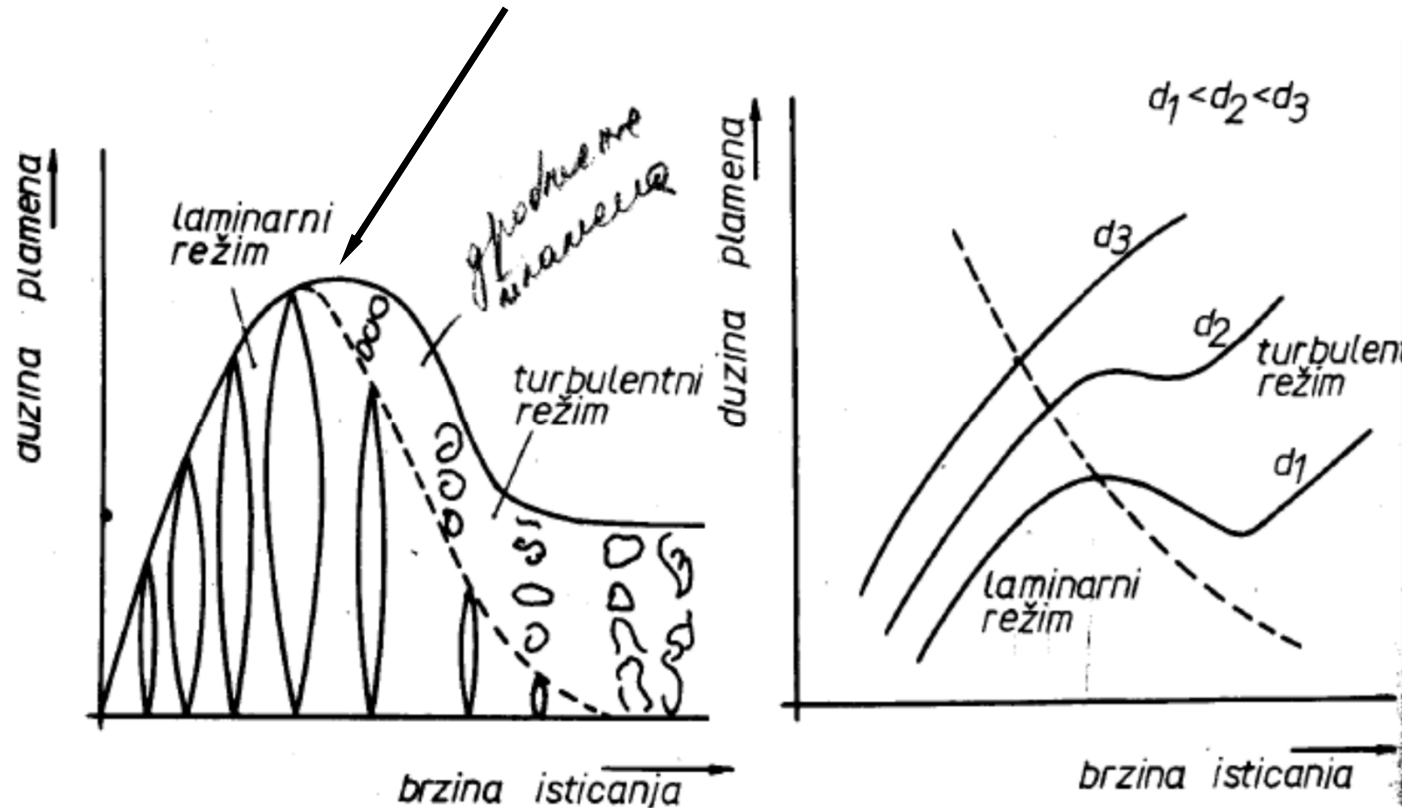
# Дифузионо сагоревање у турбулентној струји

---

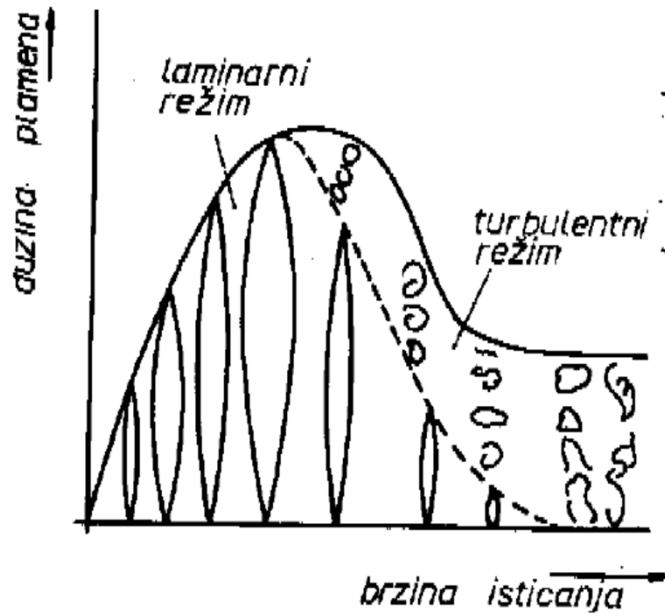
- Знатно сложеније како са аспекта физичко-хемијских појава, тако и са аспекта хемијске кинетике.
- Основни параметри су брзина и степен турбуленције.
- Прелазак из ламинарног у турбулентни режим одвија се при  $Re=2500$  у зависности од врсте горива и примарног ваздуха.

# Дифузионо сагоревање у турбулентној струји

Максимална брзина представља границу између ламинарног и турбулентног режима струјања



# Дужина турбулентног дифузионог пламена



$$L : \frac{d^2 U}{DU} : d$$

Дужина пламена се повећава са повећањем брзине истицања до максималне вредности, а затим са даљим порастом брзине истицања дужина пламена се смањује уз појаву дробљења пламена. Преласком у турбулентни режим дужина пламена опада на неку вредност и остаје константна, уз све видљивију појаву дробљења пламена.

# Кинетичко сагоревање

- Претходно припремљена смеша гасовитог горива и ваздуха у стехиометријском односу
- У зони формирања пламена ова смеша може да сагорева у ламинарном или турбулентном режиму
- Дужина пламена

$$L_{pl} ; \frac{r_m w_s}{U_N}$$

$r_m$  - брзина струјања свеже смеше

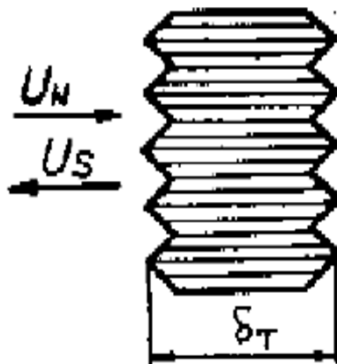
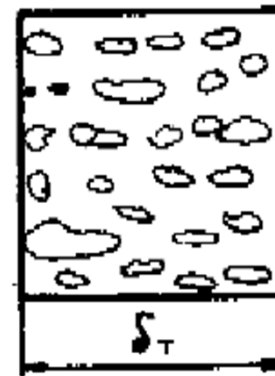
$w_s$  - пречник млазнице горионика

$u_N$  - нормална брзина сагоревања

# Геометрија и степен разбијености пламена



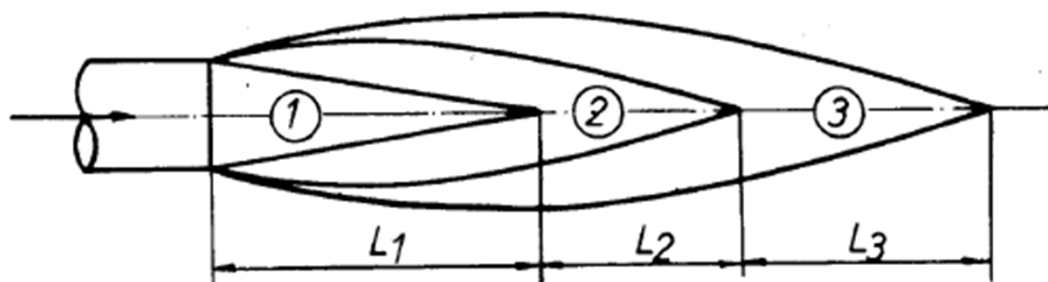
Ламинарни  
пламен



Турбулентни пламен са малим  
степеном турбуленције

Турбулентни пламен са великим степеном турбуленције – велики број раздробљених пламена, сагоревање се одвија кроз елементарне волумене гасне смеше. Фронт пламена је врло недефинисан како у простору, тако и временски.

# Дужина турбулентног пламена



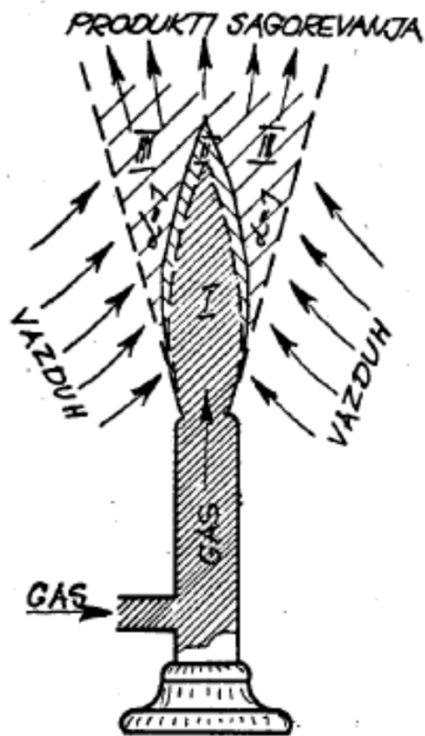
1 – зона хладног дела

2 – зона највеће измене материје

3 – зона догоревања

Дужина наведених зона је директно пропорционална брзини струјања и пречнику млазнице горионика, а обрнуто је пропорционална брзини сагоревања.

# Дифузиони пламен



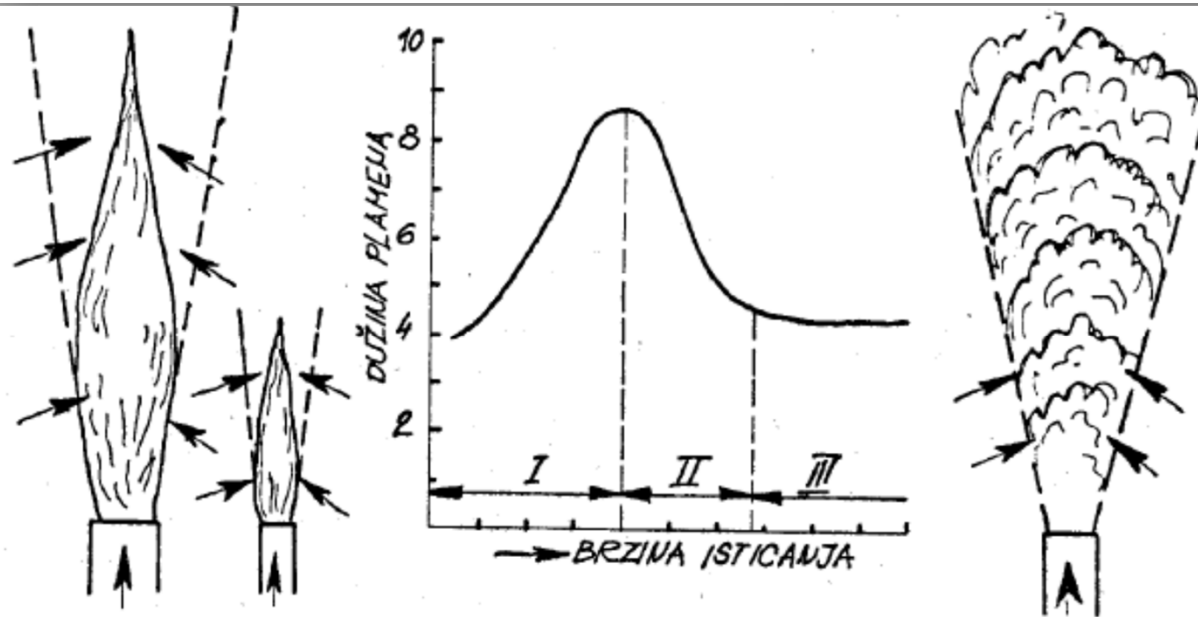
Пресек пламена код дифузионог горионика

I - Чист гас - гас истиче из горионика.

II - Смеша гасовитог горива и продуката сагоревања – Смеша се образује дифузионим мешањем гаса са ваздухом. Смеша се потпаљује и образује се зона стабилног фронта пламена. Процес споре молекуларне дифузије је изражен издуженим пламеном са оштрим врхом. Гас у зони непосредно уз горионик добија ваздух за сагоревање и услед сагоревања образују се продукти сагоревања.

III - Смеша ваздуха и продуката сагоревања - Молекули ваздуха неопходни за сагоревања преостале количине горива дифузијом пролазе кроз слој продуката сагоревања.

# Дужина пламена



Дужина пламена се може мењати у зависности од радних параметара горионика. Повећањем брзине истицања повећава се и дужина дифузионог пламена, све до одређене границе када се јавља турбулентно струјање. При појави турбулентног струјања долази до интензивног образовања смеше на рачун померања слојева попречно у односу на струју. При чисто турбулентном режиму повећањем брзине истицања дужина пламена остаје непромењена.

---

# **Сагоревање гасовитих горива**

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Довођење одређене количине гаса и ваздуха до места сагоревања
- Паљење и сагоревање
- Стабилно сагоревање.

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

## ■ Захтеви

- Обезбеђен одговарајући проток гаса и ваздуха
- Могућност регулације протока гаса у одређеном опсегу
- Сагоревање по одређеној методи (процедури)
- Остваривање стабилног пламена одређених топлотних и аеродинамичких карактеристика
- Безбедан, сигуран и дуготрајан рад
- Једноставна конструкција
- Задовољење захтева у погледу емисија токсичних компоненти
- .....

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Основни параметри:
  - Номинална снага горионика
  - Регулација горионика по тоplotној снази
  - Номинални притисак гаса и ваздуха испред горионика
  - Номинална релативна дужина пламена
  - Притисак у комори за сагоревање
  - Бука, материјали
  - ....

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Номинална снага горионика
  - максимална снага уз задовољење захтева о дозвољеним емисијама
  - зависи од протока гаса, топлотне моћи гаса, степена корисности

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Максимална топлотна снага горионика
  - 0,9 снаге која одговара горњој граници стабилног сагоревања
- Минимална топлотна снага горионика
  - 1,1 снаге која одговара доњој граници стабилног сагоревања

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Регулација горионика по тоplotној снази
  - Коефицијент граничног регулисања горионика – однос  $\max$  и  $\min$  тоplotне снаге
  - Коефицијент радног регулисања горионика – однос номиналне и  $\min$  тоplotне снаге.

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- номинални притисак гаса испред горионика – притисак гаса непосредно испред горионика који одговара номиналној тоplotној снази при атмосферском притиску у ложишту
- максимални/минимални притисак гаса испред горионика – притисак испред горионика који одговара максималној/минималној тоplotној снази горионика

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Номинални притисак ваздуха испред горионика – притисак ваздуха испред горионика који одговара номиналној тоplotној снази горионика при атмосферском притиску у ложишту

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Номинална релативна дужина пламена
  - растојање дуж осе пламена од излазног пресека горионика, при номиналној снази, до тачке где концентрација  $\text{CO}_2$  износи 95% максималне вредности при  $\lambda=1$
- Специфични капацитет горионика
  - Однос масе горионика и номиналне снаге

# Уређаји за сагоревање гасовитих горива

---

- Притисак у ложишту
  - притисак у зони излазног пресека горионика при номиналној тоplotној снази горионика
- Остале карактеристике
  - пречник излазног отвора горионика
  - пречник млазнице
  - температуре прегревања гаса и ваздуха
  - угао ширења пламена
  - димензије горионика
  - ...

# Класификација горионика

---

- Начин мешања гаса и ваздуха
- Начин довођења ваздуха
- Номинални притисак гаса и ваздуха
- ....
- Начин регулације
- Врста гаса
- Начин регулације
- ....

# Начин мешања гаса и ваздуха

---

- Гас се доводи без примарног вазуа, мешање само на основу дифузије ( $\lambda=0$ )
- Гас помешан са примарним вазухом, доводи се секундарни ваздух дифузијом ( $\lambda<1$ )
- Гас помешан са вазухом, мешање завршено до излаза из горионика – ејекторски горионици - усисан ваздух ( $\lambda>1$ )
- Гас помешан са вазухом, мешање није завршено до излаза из горионика – принудно довођење ваздуха ( $\lambda>1$ ).

# Номинални притисак гаса и ваздуха

---

- Дифузиони горионици ниског и средњег притиска ( $\lambda=0$ )
- Ејекторски горионици ниског притиска (атмосферски горионици) ( $\lambda < 1$ ,  $\lambda=0,3-0,7$ )
- Ејекторски горионици средњег и високог притиска ( $\lambda > 1$ )
- Горионици са принудним довођењем ваздуха ниског и високог притиска - довођење ваздуха уз помоћ вентилатора ( $\lambda > 1$ ).