



# **Простирање пламена**

# Фронт пламена

---

- Фронт пламена (зона сагоревања, талас сагоревања)
  - фронт који се шири кроз припремљену мешавину концентрично око центра упаљења, палећи нове слојеве смеше....
- Не постоји разлика између фронта пламена код једнокомпонентних и вишекомпонентних смеша.

# Фронт пламена

---

- Топлотни извор ствара атоме и радикале који представљају носиоце ланца у хемијској реакцији тј. утичу на одвијање хемијске реакције у најближем слоју мешавине, тако да слој постаје извор топлоте и носилаца реакције способан да изазове реакцију у суседном слоју.

# Фронт пламена

---

- Фронт пламена се шири преко феномена преноса топлоте и дифузије.
- Брзина фронта пламена је врло мала у односу на брзину звука.
- Закони
  - Закон о одржању масе
  - Закон промене кретања
  - Закон о одржању енергије
- Једначине
  - Једначина дифузије
  - Једначина брзине хемијске реакције.

# Детонациони талас

---

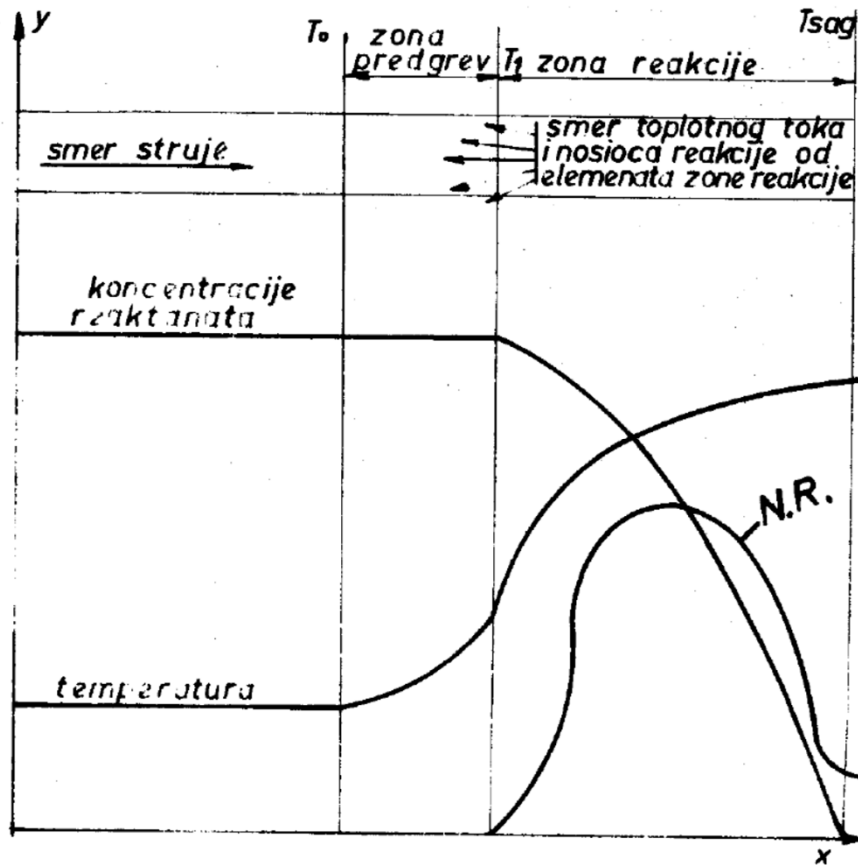
- Детонациони талас је изазван енергијом хемијске реакције високо компримоване мешавине.

# Фронт пламена

- Фронт пламена заузима узак слој и може се поделити на бесконачни број подслојева.
- Сваки подслој има
  - Температуру
  - Концентрацију носилаца реакције
  - Количину ослобођене топлоте
  - Брзину хемијске реакције.

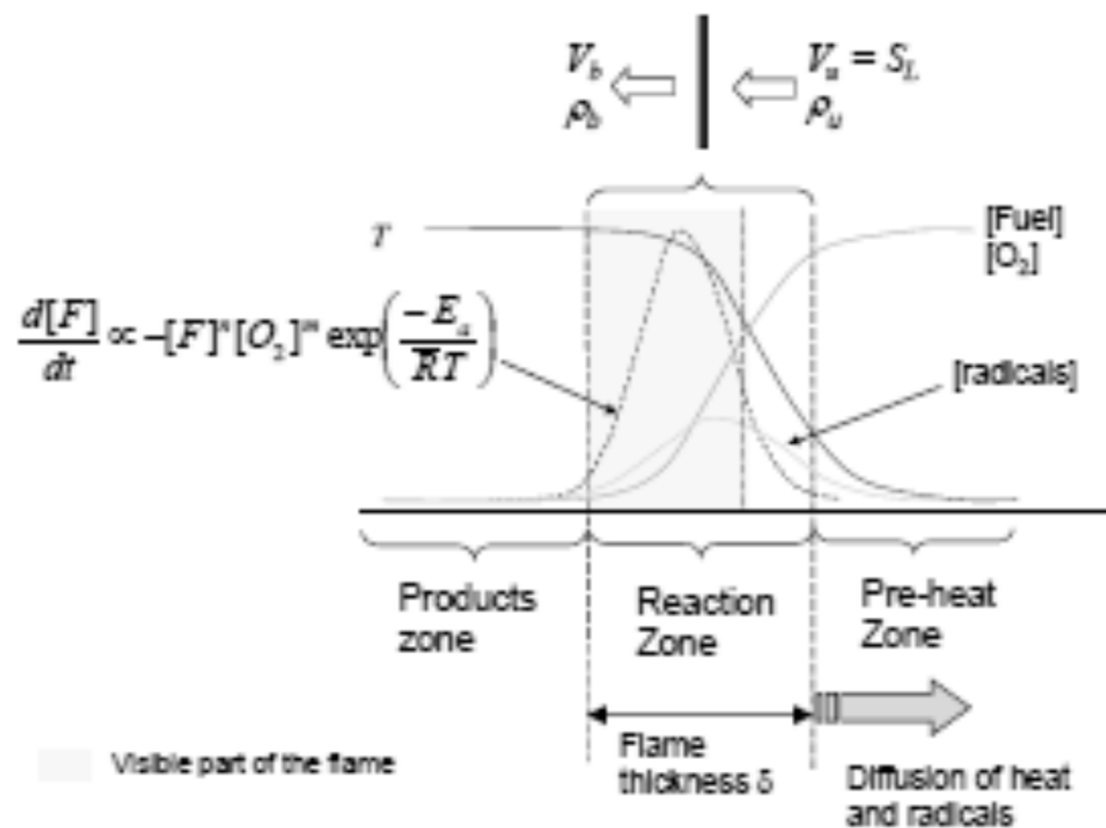


# Структура фронта пламена

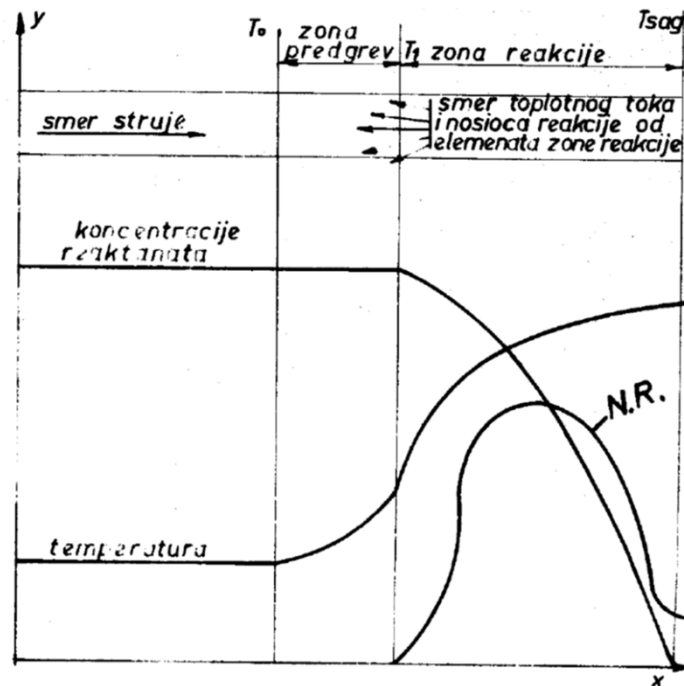


- Зона предгревања
- Зона реакције
- На структуру фронта пламена утичу
  - Врста горива (агрегатно стање)
  - Процес дифузије

# Структура фронта пламена



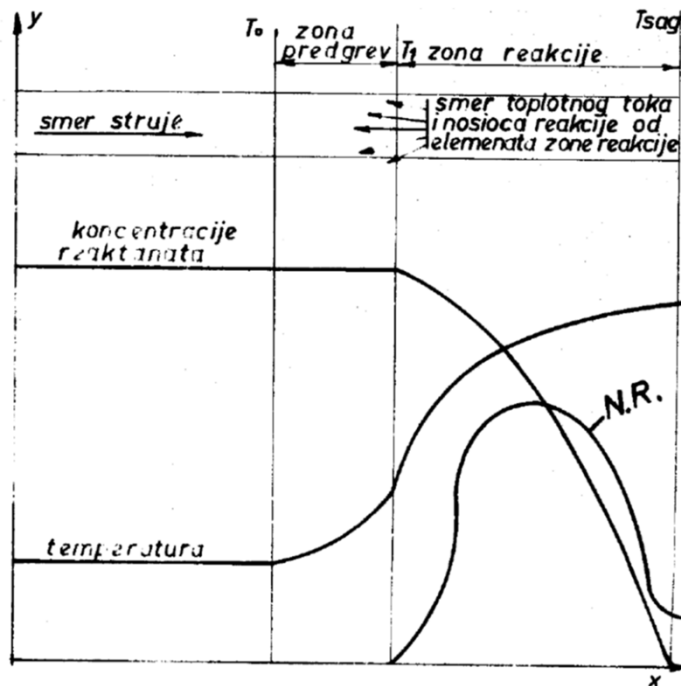
# Структура фронта пламена



## ■ Претпоставке

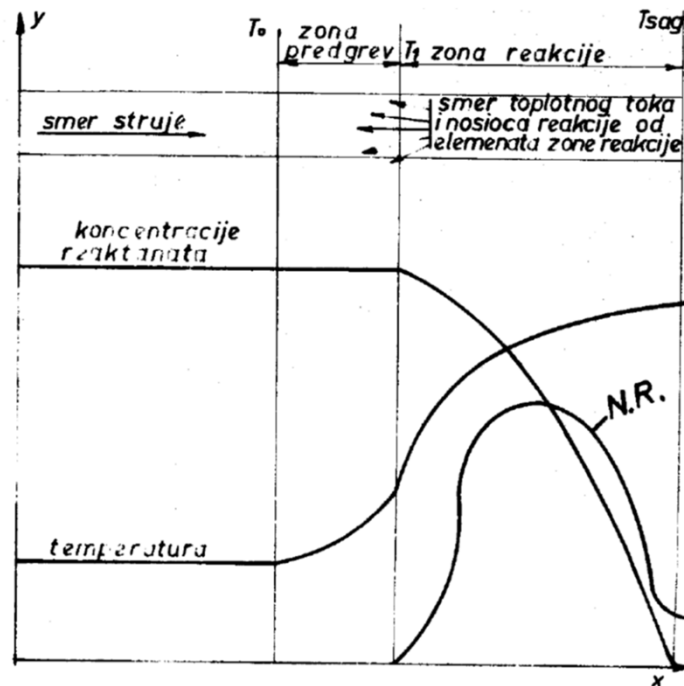
- Слојеви фронта пламена су међусобно паралелни
  - Правац струјања гориве смеше је нормалан на фронт пламена.
- ## ■ Зона фронта пламна је ограничена границама $T_0$ - $T_{sag}$ – одвијају се хемијске реакције и транспорт молекула.

# Структура фронта пламена



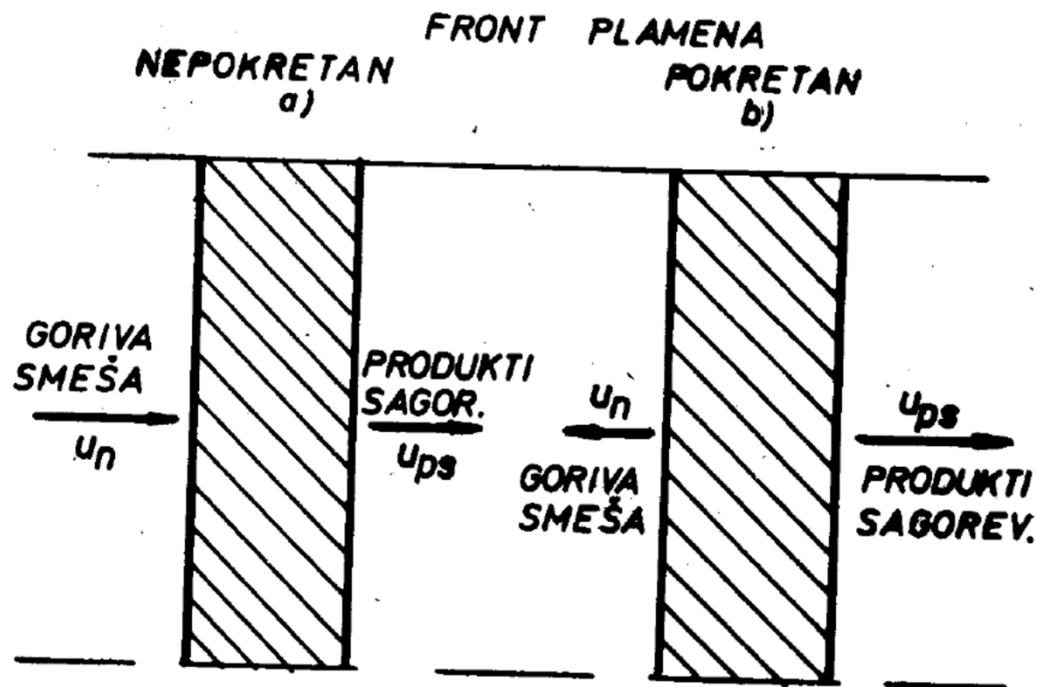
- Молекули реактаната дифундирају у смеру струје мешавине, а молекули коначних продуката дифундирају у супротном смеру.
- Молекули међупродуката дифундирају у оба смера и достижу максималну вредност негде у зони  $T_1$ - $T_{sag}$ .

# Структура фронта пламена



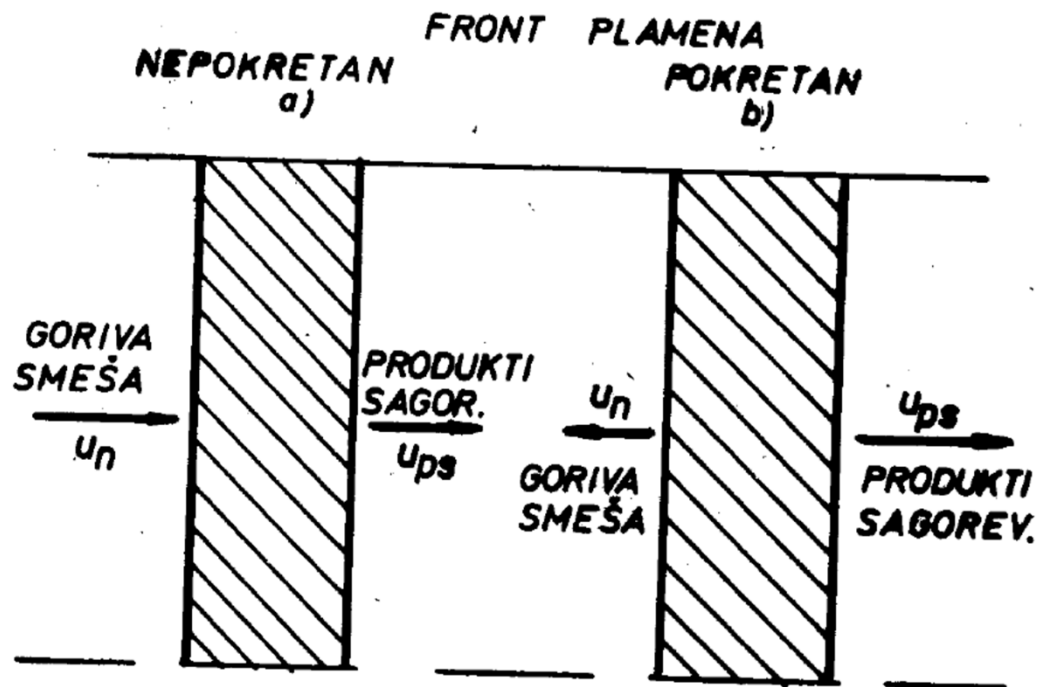
- Дифузија међупродуката је изузетно важна, а посебно дифузија атома и слободних радикала јер они представљају носиоце ланчаних реакција
- Границе зоне предгревања и зоне реакције нису јасно ограничене.

# Брзина фронта пламена



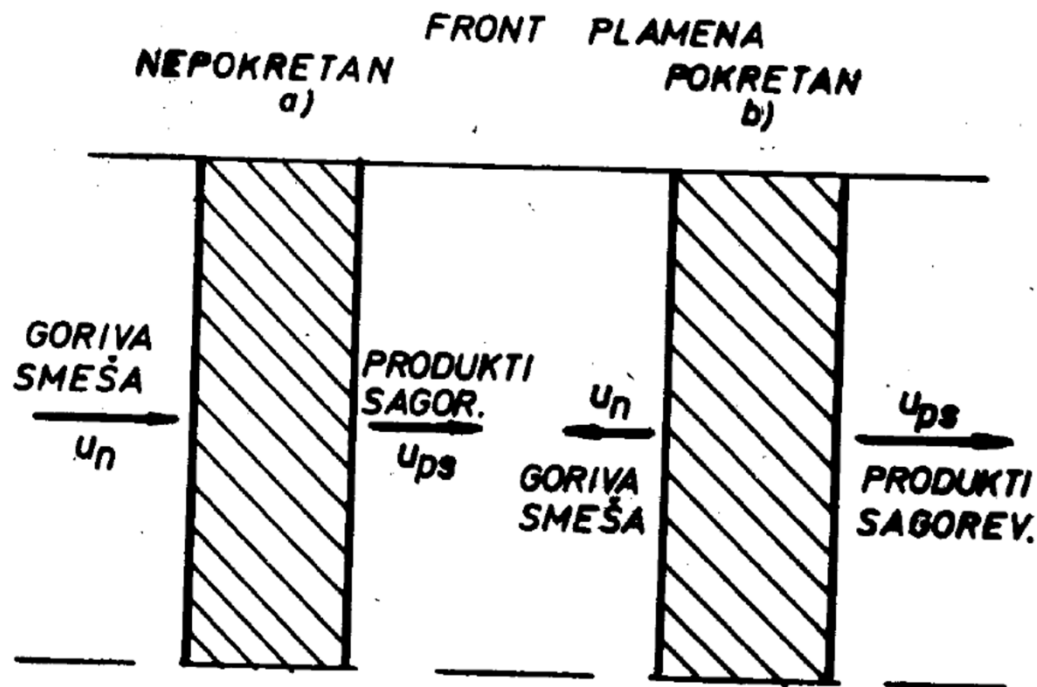
- Фронт пламена је танак слој у коме се врше хемијске реакције и представља танак слој између неупаљене и сагореле смеше.

# Брзина фронта пламена



- Нормална брзина сагоревања је линеарна брзина којом се креће фронт пламена нормално на своју површину кроз већ припремљену гориву смешу.

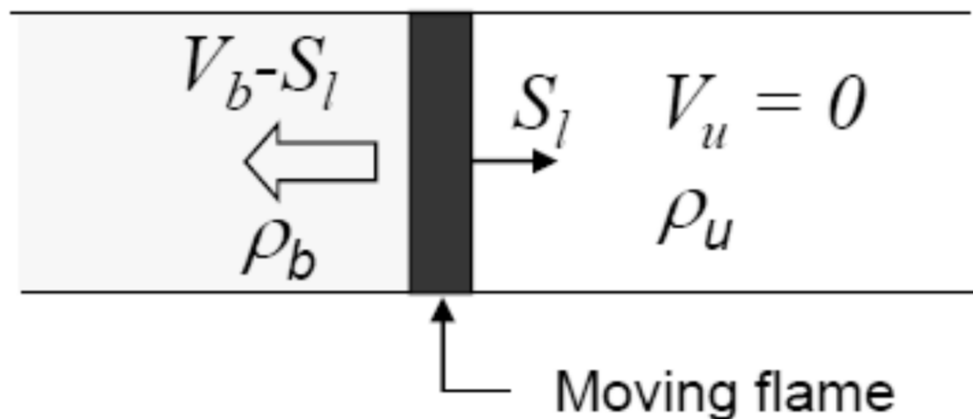
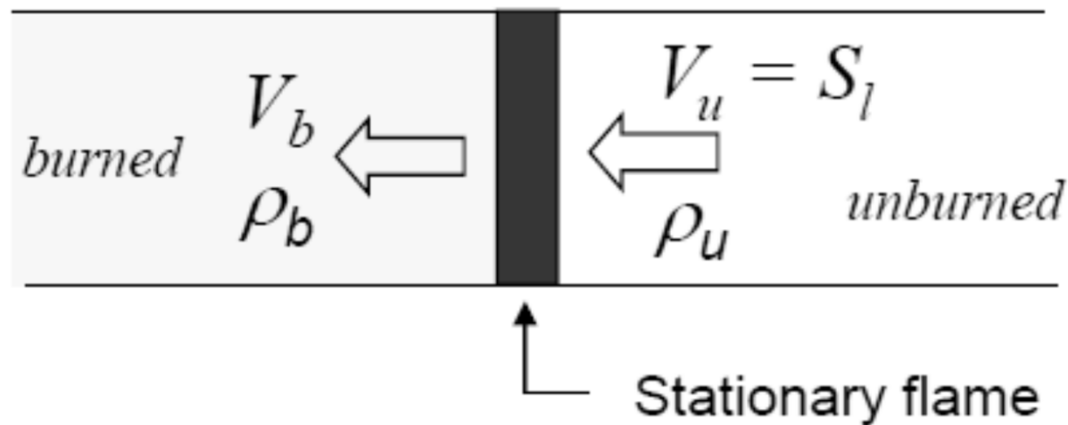
# Брзина фронта пламена



## ■ Фронт пламена може бити

- Непокретан – брзина сагоревања се дефинише утрошком гориве смеше.
- Покретан – брзина сагоревања се дефинише брзином простирања пламена.

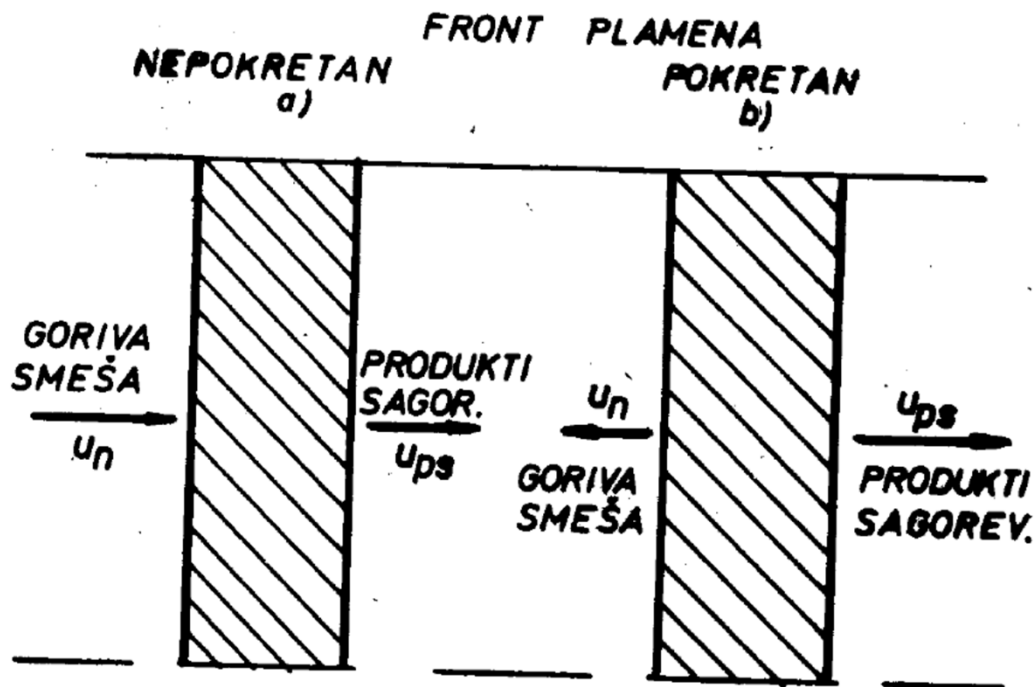
# Брзина фронта пламена



## ■ Фронт пламена може бити

- Непокретан – брзина сагоревања се дефинише утрошком гориве смеше.
- Покретан – брзина сагоревања се дефинише брзином простирања пламена.

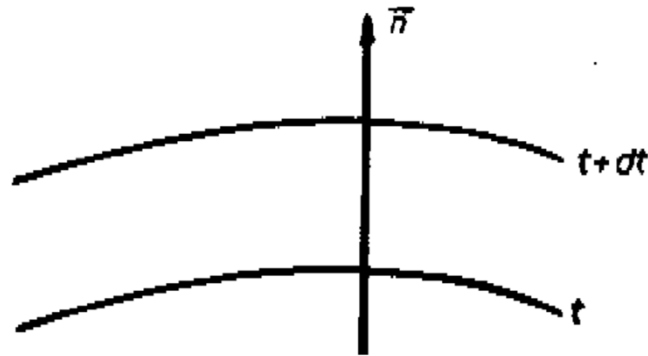
# Брзина фронта пламена



- Брзина простирања продуката сагоревања је знатно већа због предгревања и ширења гаса.

- Брзина фронта пламена је реда величине неколико метара у секунди.
- Зависи од врсте горива и притиска.

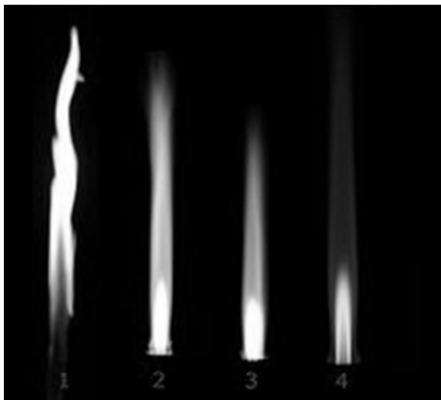
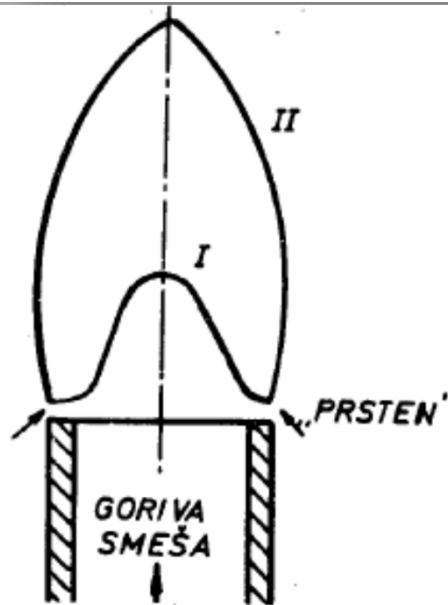
# Брзина фронта пламена



$$u_n = \frac{dn}{dt}$$

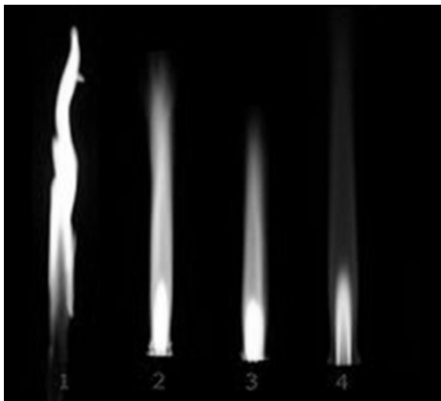
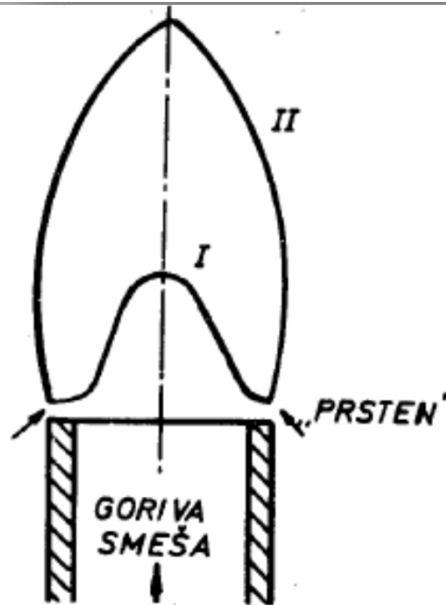
- $dn$  – величина фронта пламена, нормално на површину у смеру свеже смеше
- $u_n$  – зависи да ли се смеша креће или мирује

# Брзина фронта пламена



- Горива смеша истиче из горионика.
- Ламинарно струјање.
- Параболична расподела брзина – највећа брзина у оси, на зидовима једнака нули, у близини зидова брзина струје гориве смеше једнака је брзини простирања пламена.

# Брзина фронта пламена

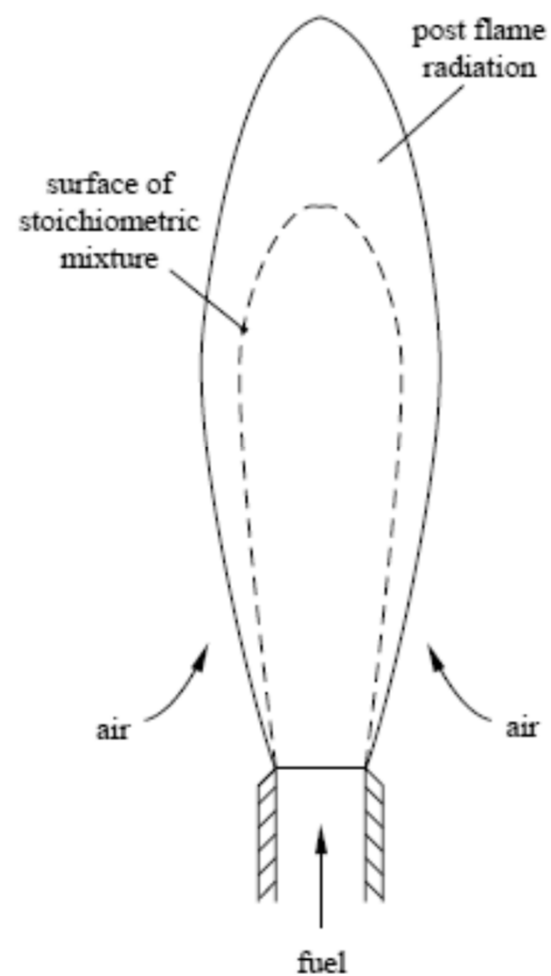
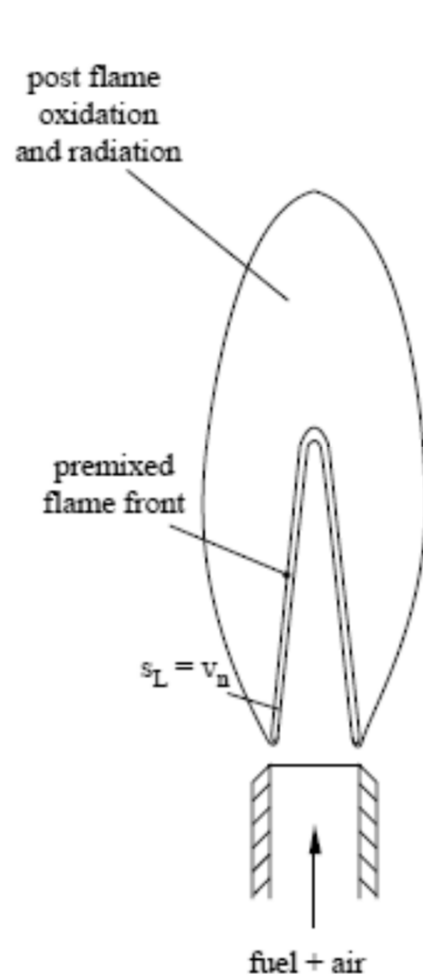


- Контура I – област у којој се одвија највећи део хемијских реакција, димензије и облик зависе од протока гориве смеше кроз горионик.
- Контура II – довршава се процес догоревања уз учешће кисеоника из околног ваздуха.

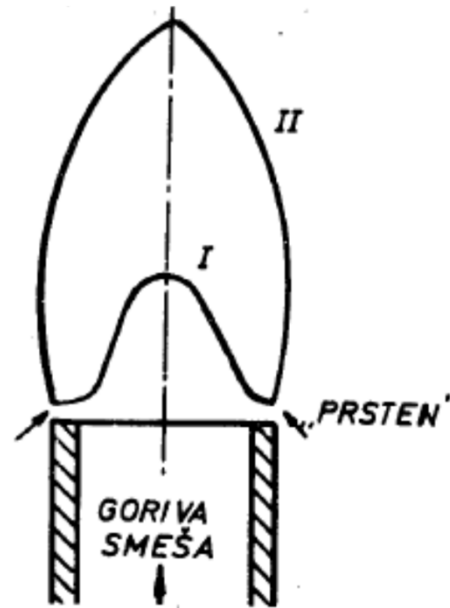
# Брзина фронта пламена

premixed flame

diffusion flame



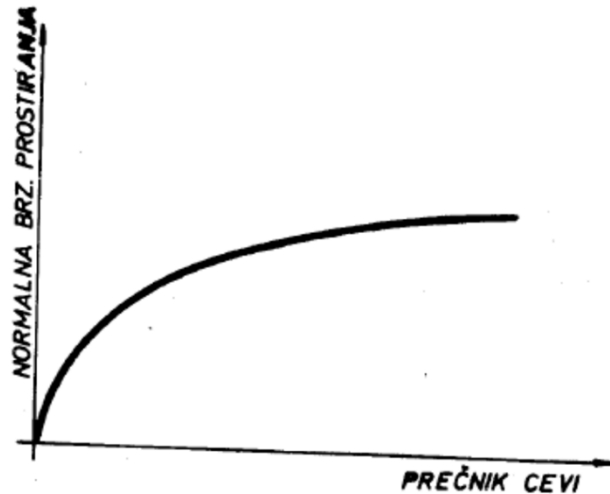
# Брзина фронта пламена



$$u_n = \frac{\dot{G}_s}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}}$$

- $G_s$  - проток смеше
- $r$  - полупречник горионика
- $h$  - висина конуса II

# Нормална брзина сагоревања

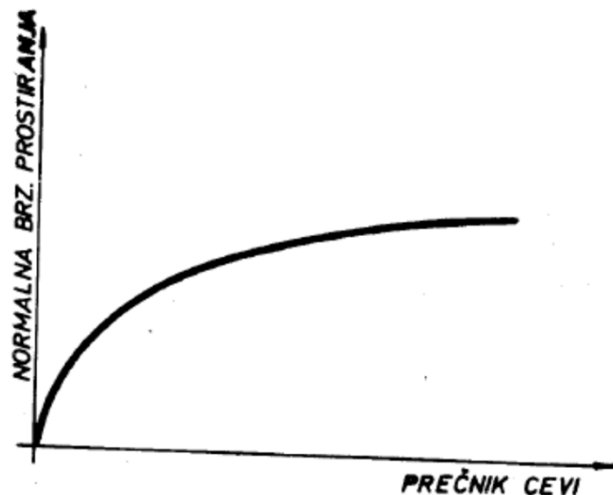


- Нормална брзина простирања пламена зависи од:
  - Својстава смеше
  - Концентрације
  - Притиска
  - Температуре

При повећању топлотних губитака снижава се температура сагоревања, а смањује се и брзина простирања пламена.

Критични пречник при коме се прекида сагоревање у цеви зависи од теоријске брзине простирања пламена и од притиска гаса.

# Нормална брзина сагоревања



- Са повећањем пречника цеви утицај топлотних губитака се смањује, па при неком довољно великом пречнику брзина простирања постаје константна за одређену смешу.

Највећа брзина простирања пламена је за мешавине блиске стехиометријској.

На нормалну брзину простирања пламена утиче почетна температура мешавине.

# Брзина простирања пламена

- Максимална брзина простирања пламена за мешавину више компоненти

$$u_{n_{\max}} = \frac{c_1 u_{n1} + c_2 u_{n2} + \dots}{c_1 + c_2 + \dots}$$

$u_{n1}, u_{n2}$  – нормалне брзине простирања пламена за сваку гориву компоненту

$$u'_{n_{\max}} = K \cdot u_{n_{\max}}$$

$c_1, c_2$  – садржај горивих компоненти

$u_{n_{\max}}$  – брзина без инертних примеса

$$K = \frac{100 - N_2 - 1,1CO_2}{100}$$

# Простирање пламена у турбулентној струји



Турбулентно струјање:

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

Фронт пламена:

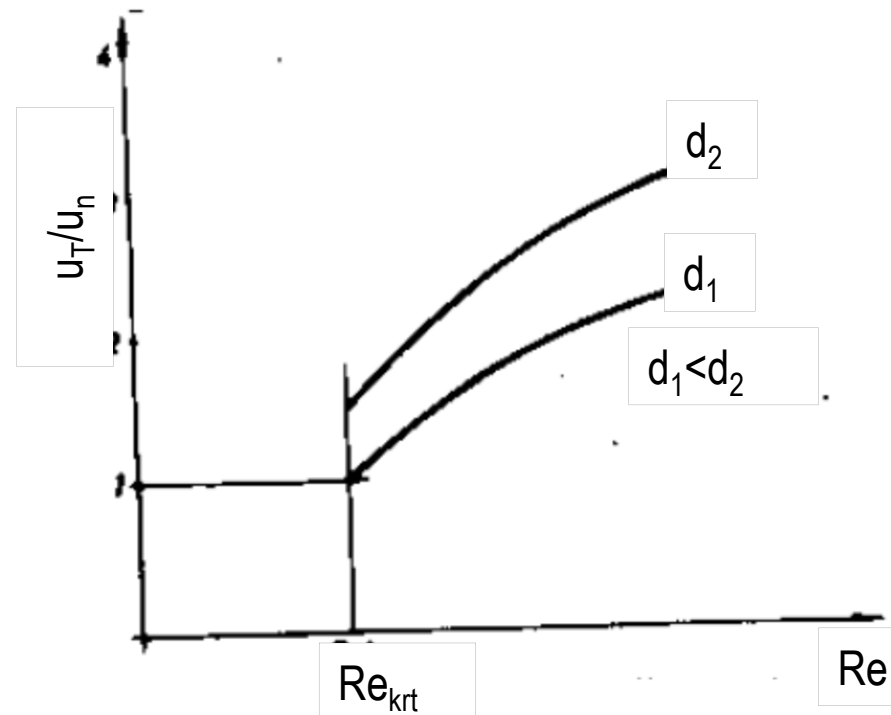
- ламинарни режим - једна глатка равна површина
- турбулентни режим - фронт пламена се мање или више повија и разбија у већи број независних сегмената (у зависности од степена турбуленције).

# Простирање пламена у турбулентној струји

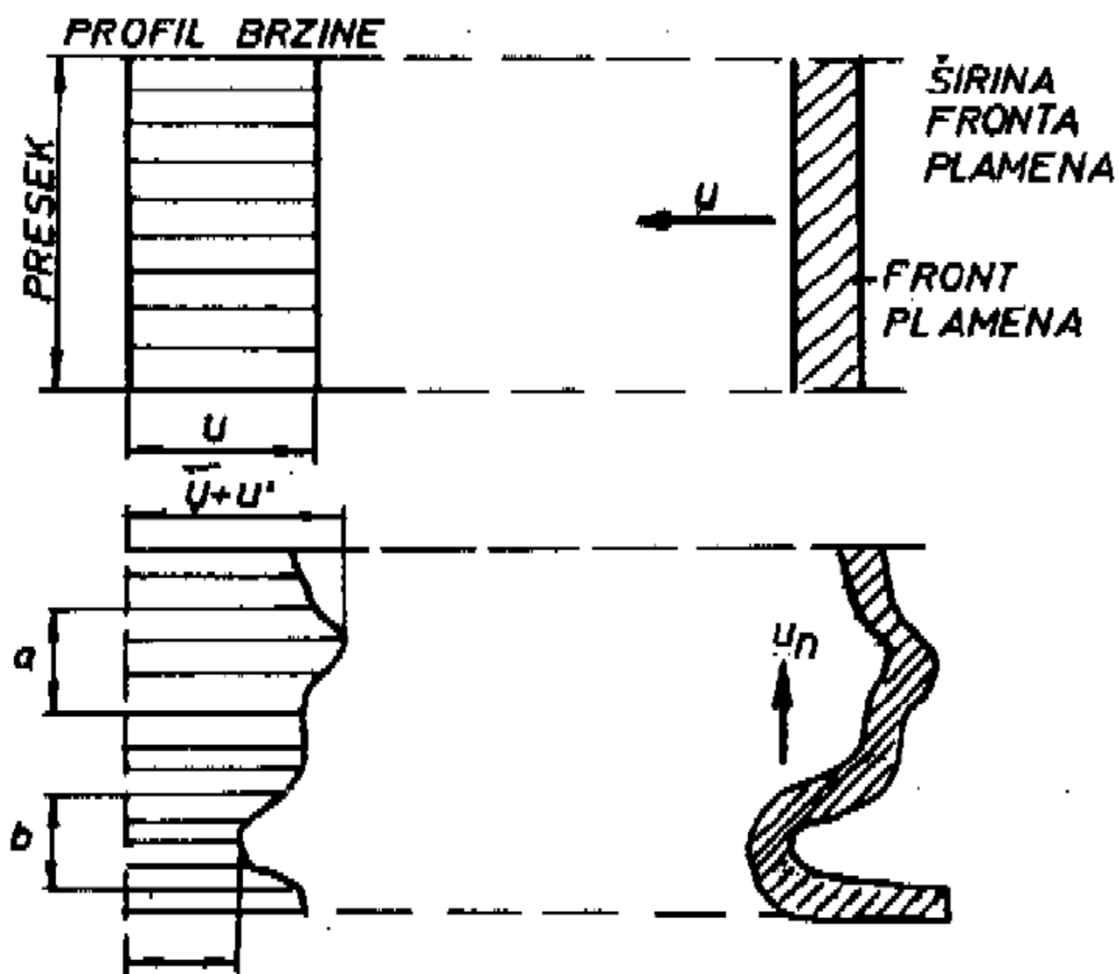


Турбулентни режим:

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



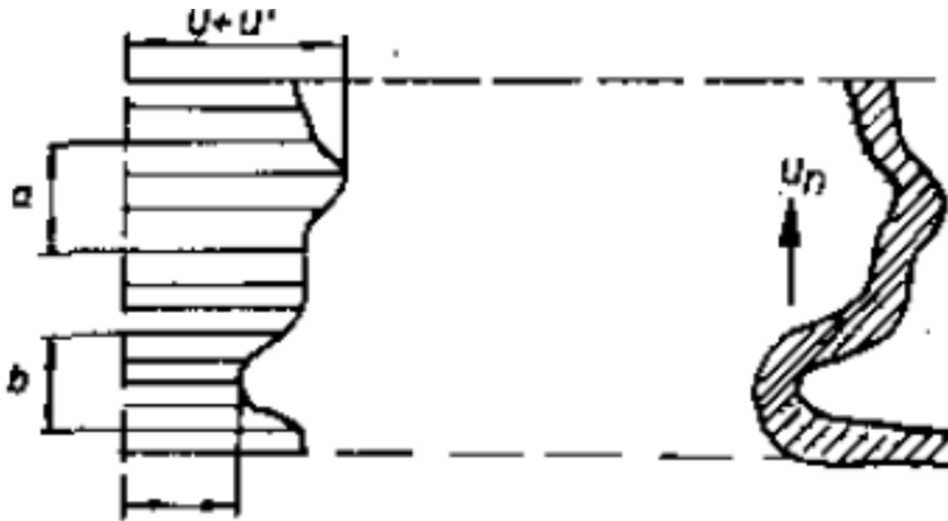
# Простирање пламена у турбулентној струји



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 ( $u_T$ )

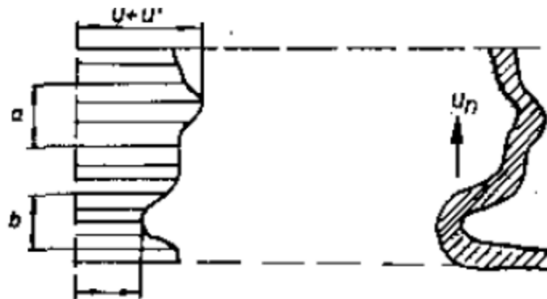
Површина фронта пламена је пропорционална флукуацији брзине  $\pm u$ .

- 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.



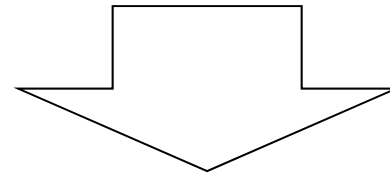
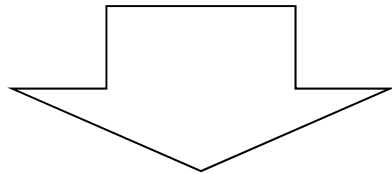
## Велика турбуленција:

- 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  $\delta$

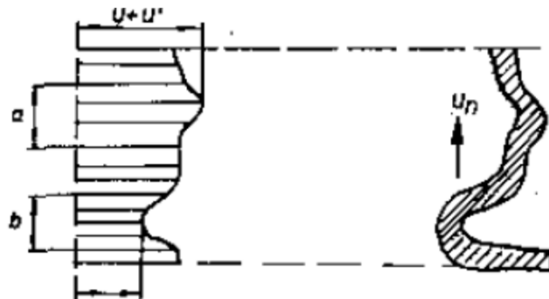


Мала турбуленција:

- $l < \delta$

Велика турбуленција:

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

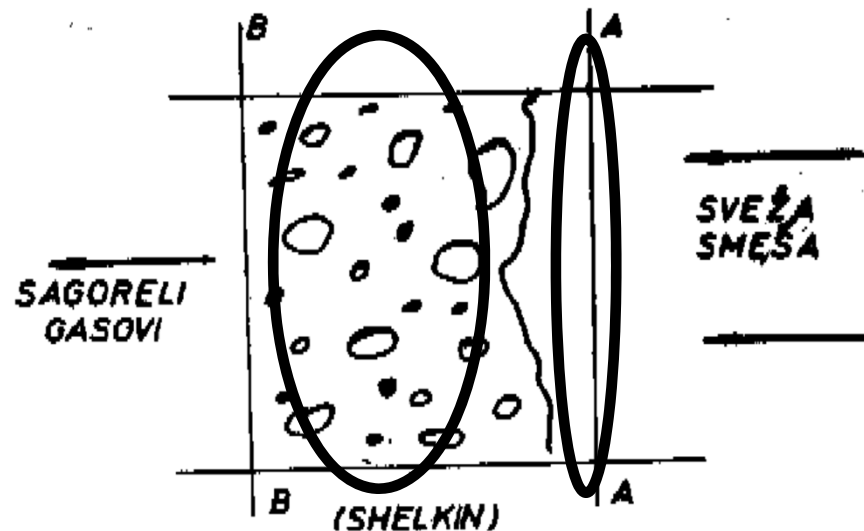


# Простирање пламена у турбулентној струји

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



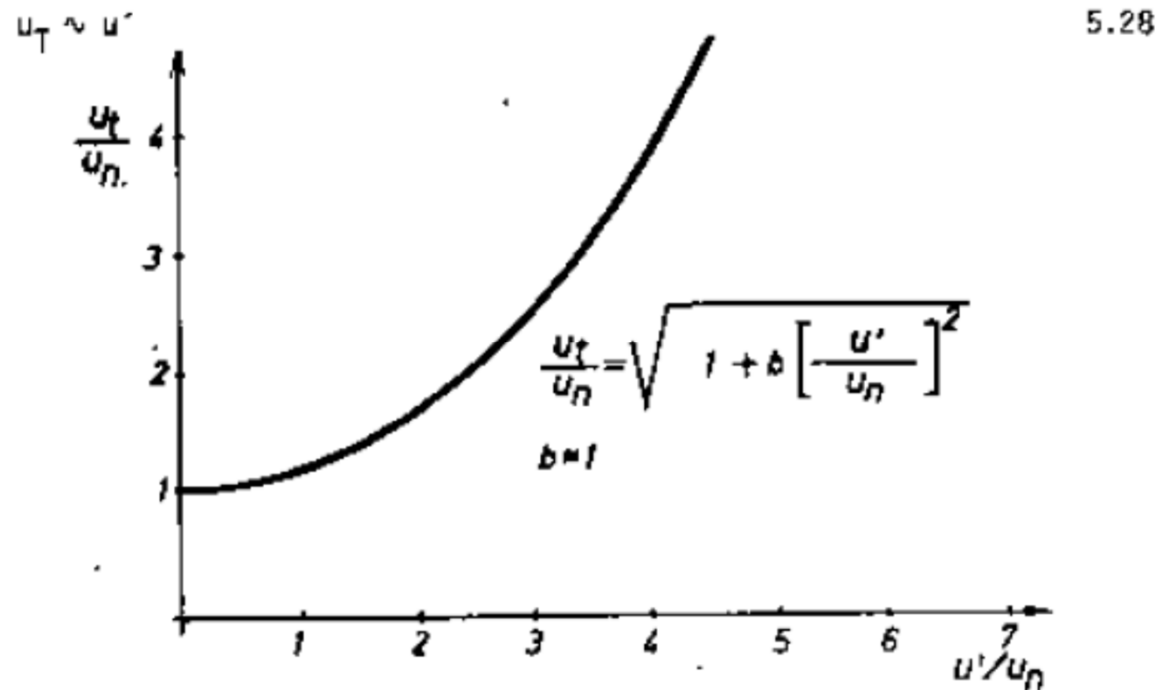
# Простирање пламена у турбулентној струји

---

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

---

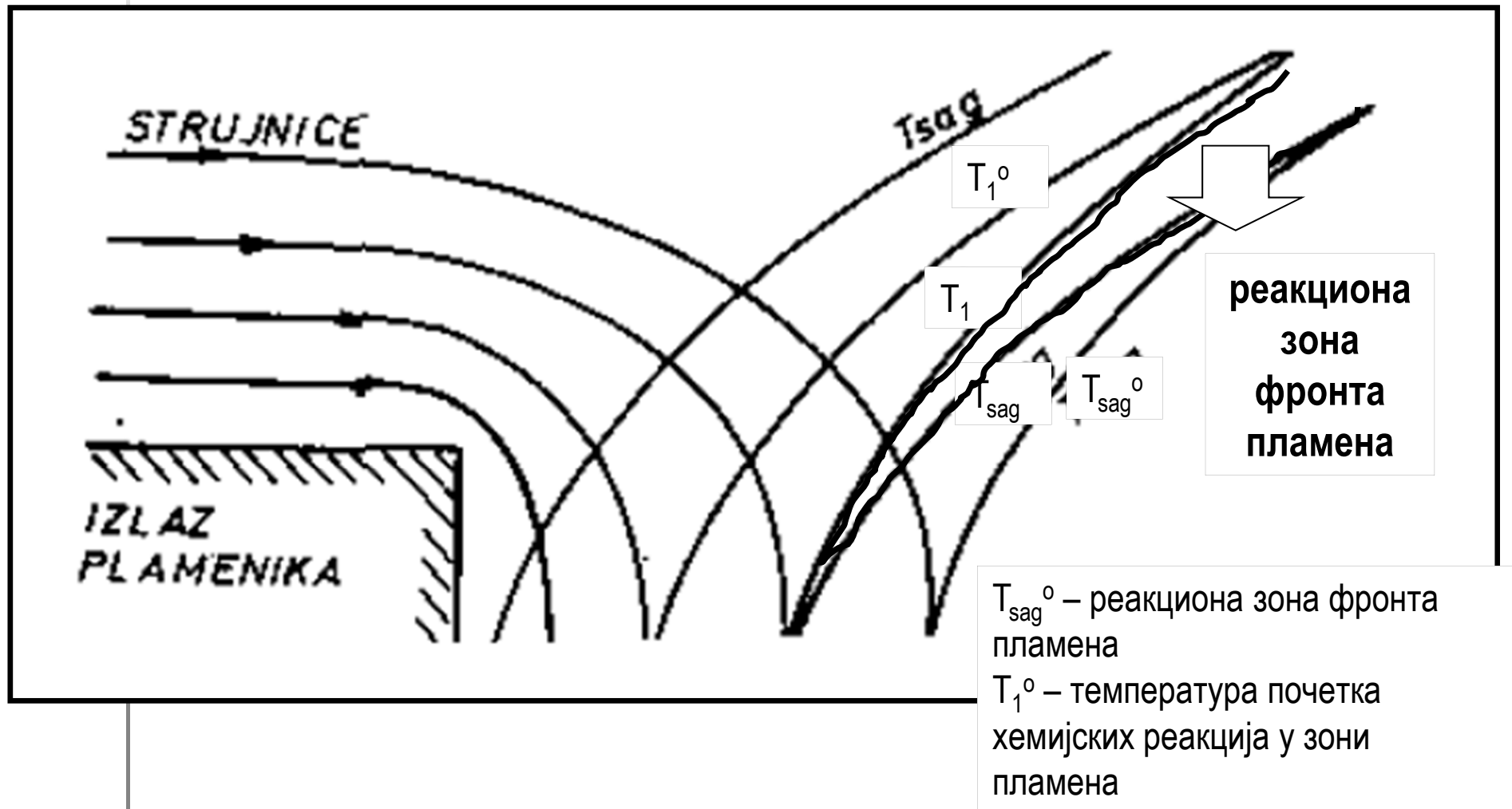
- У случају јако турбулентног пламена већи део кинетичке енергије изазване око ламинарног пламена се трансформише у енергију турбуленције.
- У непосредној близини несагорелог гаса интензитет турбуленције је знатно мањи од неке средње вредности у пламену.

# Струјна стабилизација фронта пламена

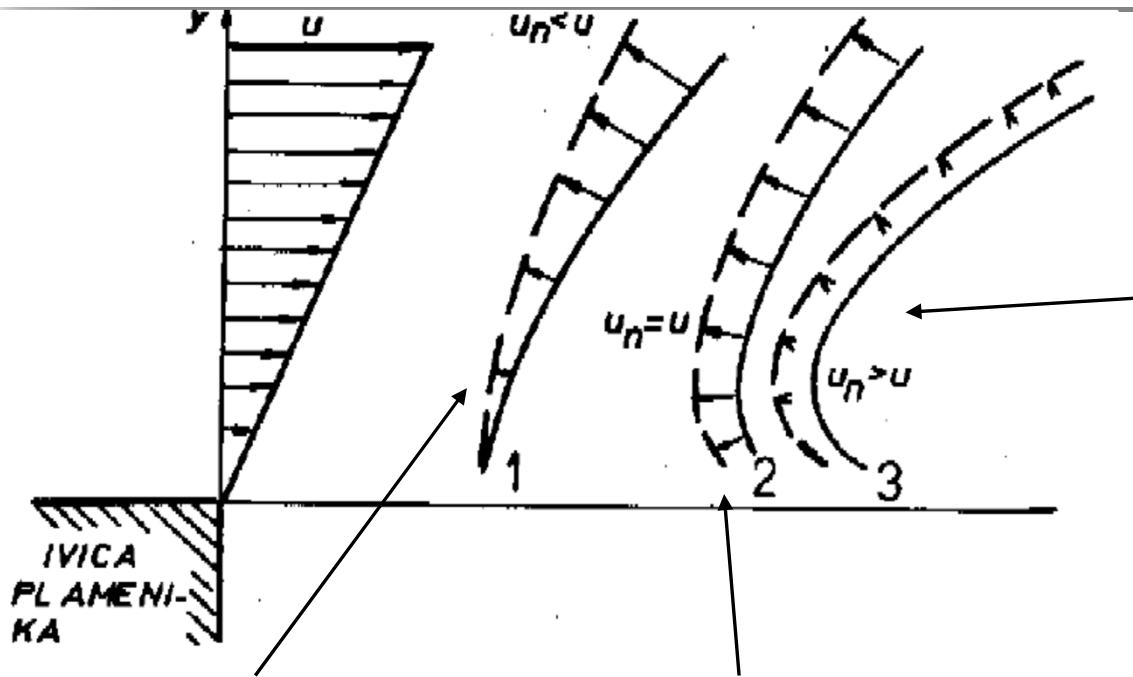
---

- 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

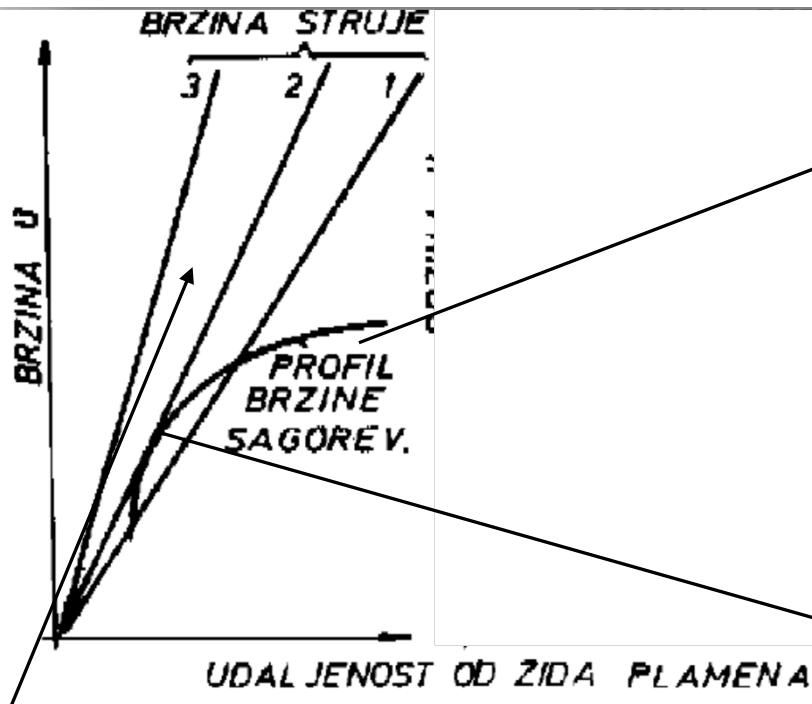


Брзина сагоревања већа од брзине струјања, тако да се пламен повија према равнотежном положају.

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

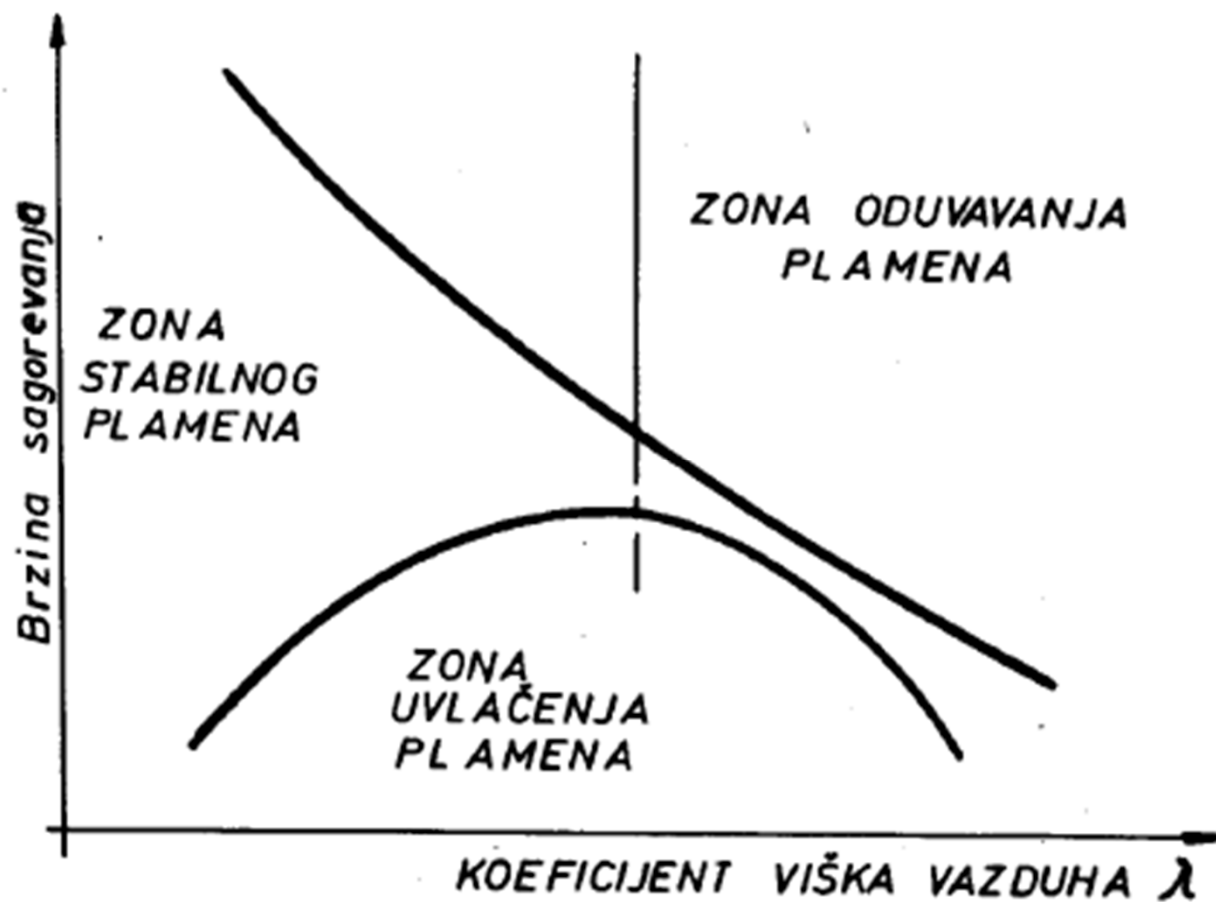


Брзина сагоревања је већа од брзине струјања, фронт пламена се враћа унатраг – увлачење фронта пламена

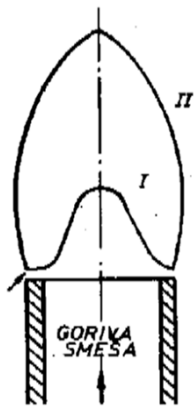
Гранично стање, профил брзине сагоревања тангира криву брзине струјања

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.

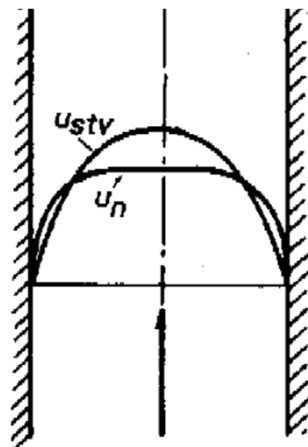
# Стабилизација фронта пламена



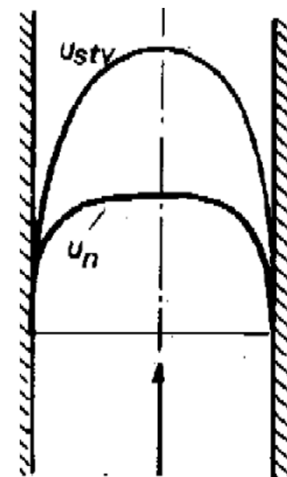
# Фронт пламена



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

---

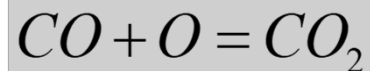
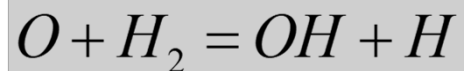
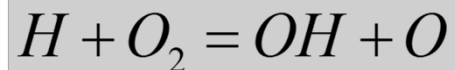
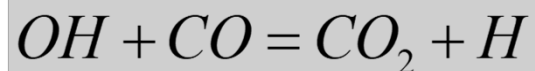
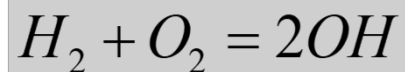
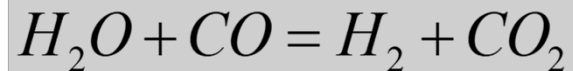
- Паралелна струја гаса и ваздуха, угао сусретања струја  $0^\circ$ .
- Попречна струја гаса или ваздуха на другу струју, угао сусрета струја од  $30$  до  $90^\circ$ .
- Супротносмерно струјање гаса и ваздуха, угао сусрета  $180^\circ$ .

# 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

---

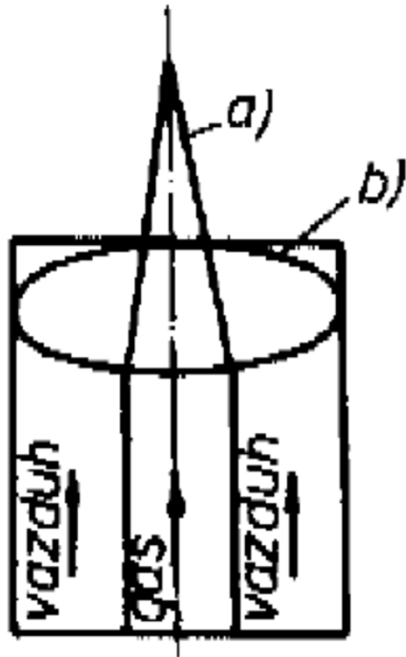
- Сагоревање угљоводоника се одвија кроз читав низ сложених ланчаних реакција.
- Карактеристично је да ове реакције имају дугачак период индукције – почетне реакције су споре и пораст температуре је спор.

# 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

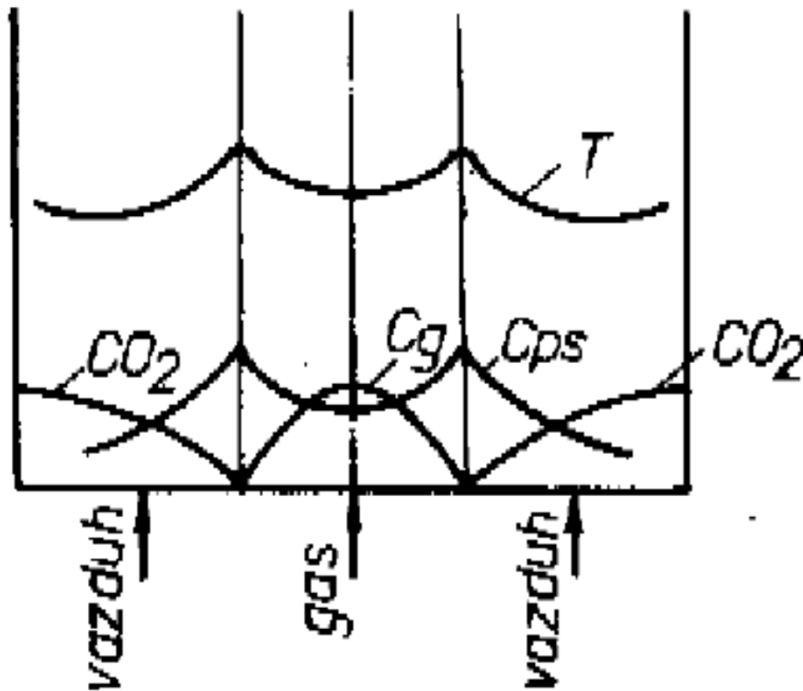


Количина ваздуха већа од  
количине потребне за  
сагоревање горива (случај а).

Пламен је издужен по оси  
горионика.

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

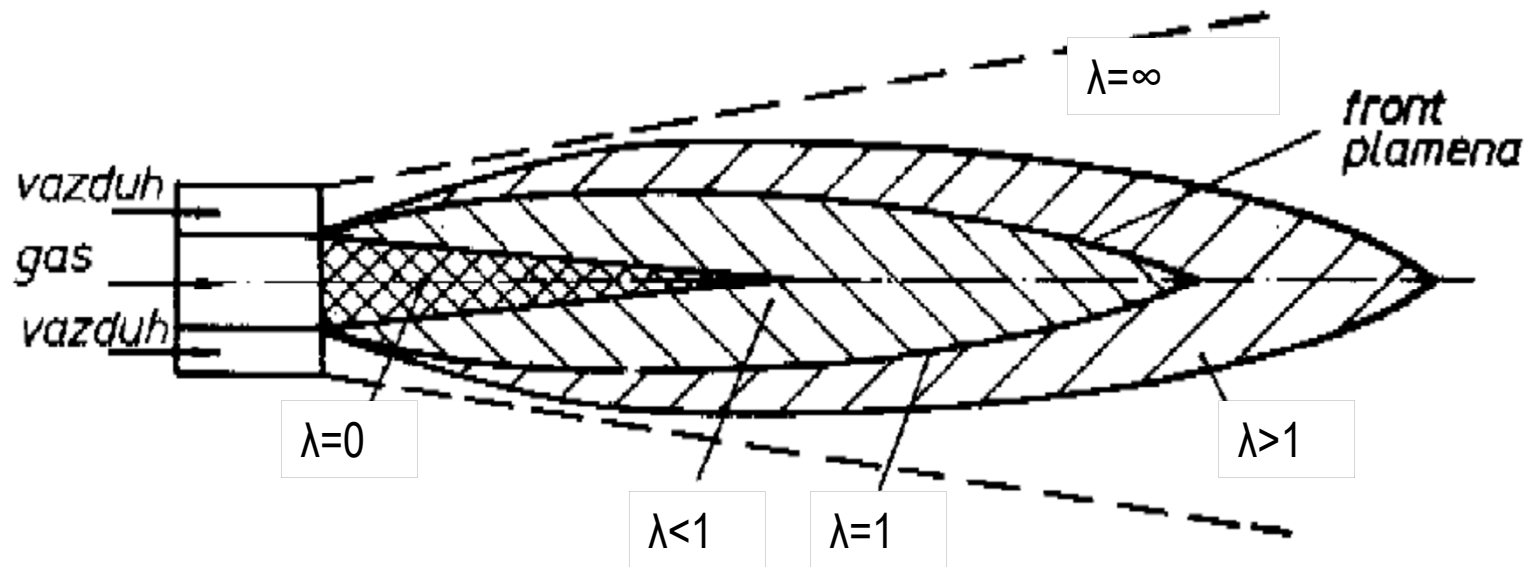
# Дифузионо сагоревање у ламинарној струји



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

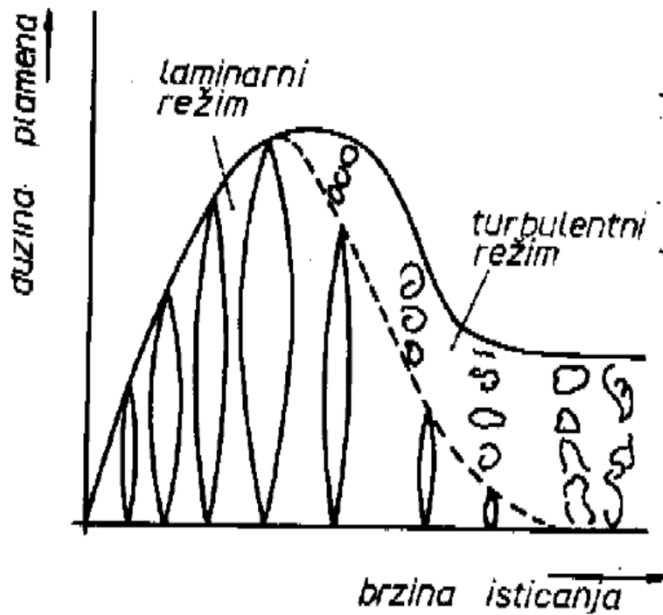
$\lambda>1$

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

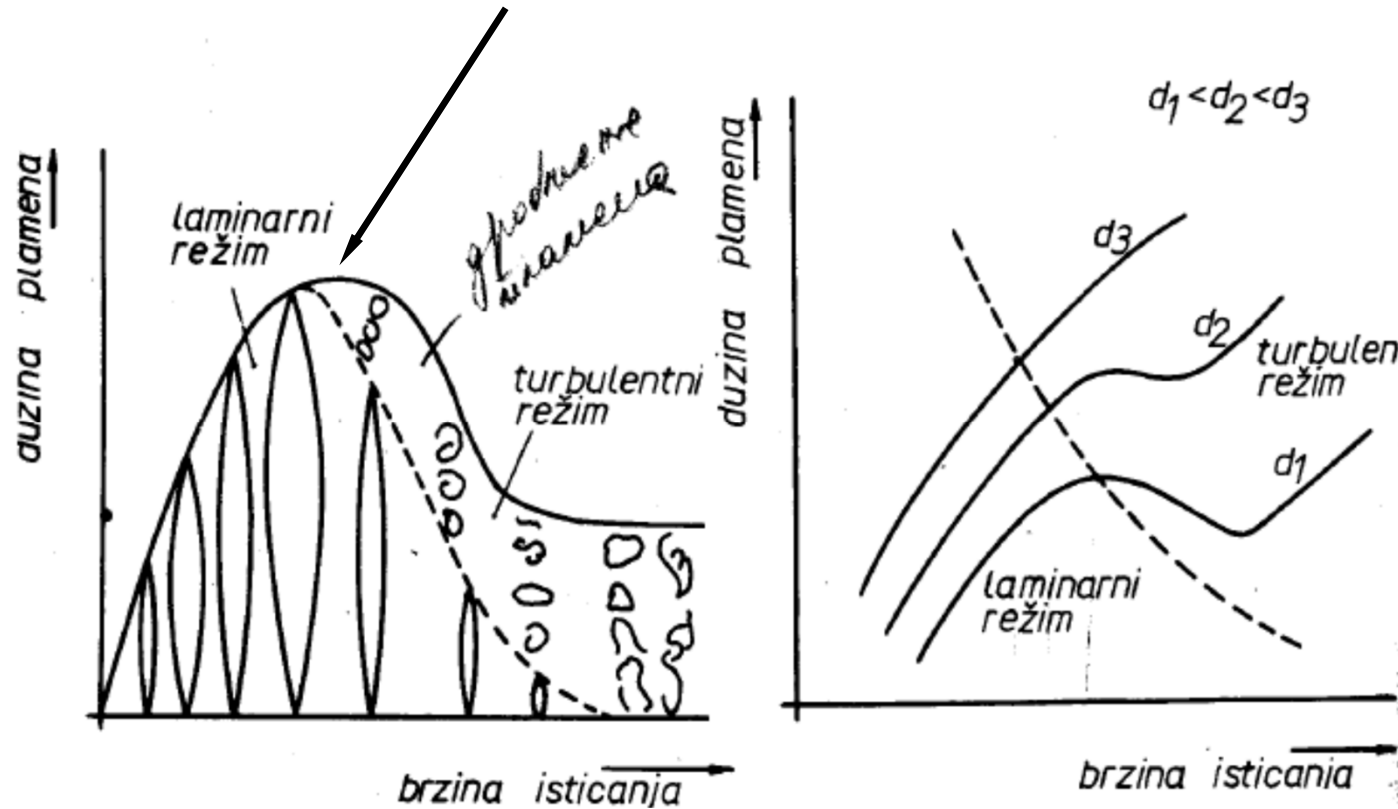
# Дифузионо сагоревање у турбулентној струји

---

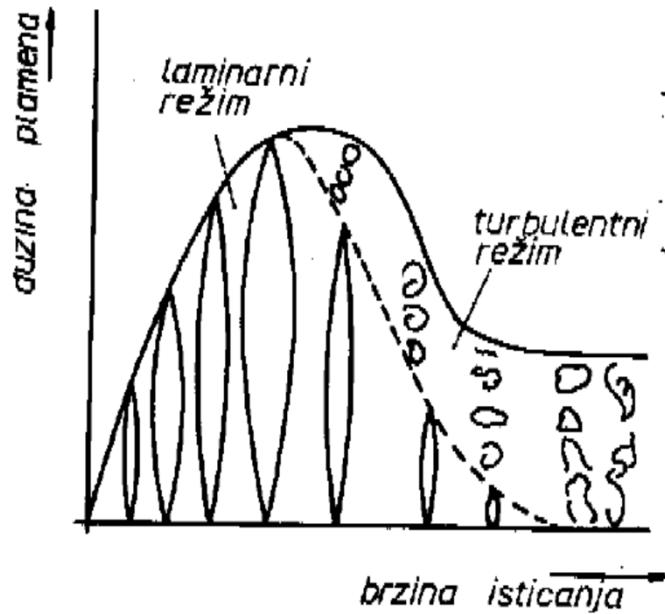
- Знатно сложеније како са аспекта физичко-хемијских појава, тако и са аспекта хемијске кинетике.
- Основни параметри су брзина и степен турбуленције.
- Прелазак из ламинарног у турбулентни режим одвија се при  $Re=2500$  у зависности од врсте горива и примарног ваздуха.

# 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

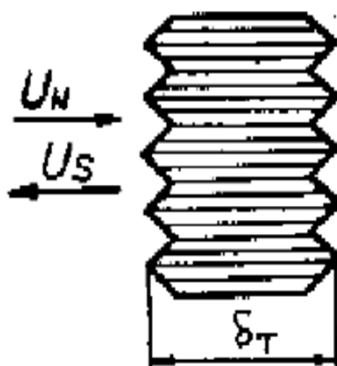
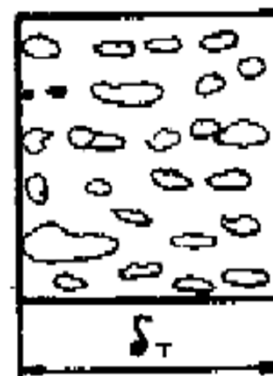
$w_s$  - пречник млазнице горионика

$u_N$  - нормална брзина сагоревања

# Геометрија и степен разбијености пламена



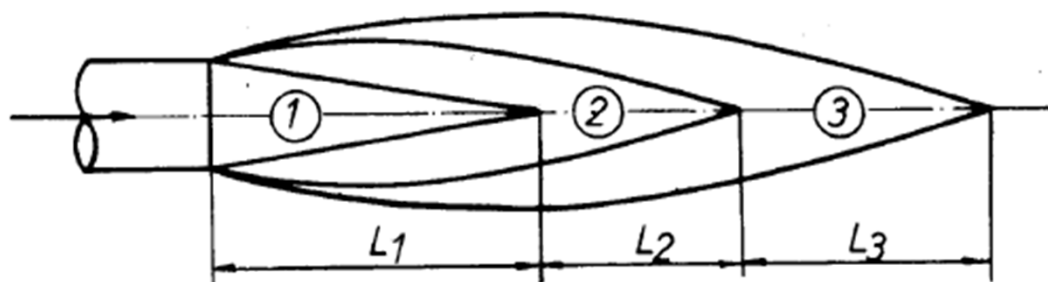
Ламинарни пламен



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



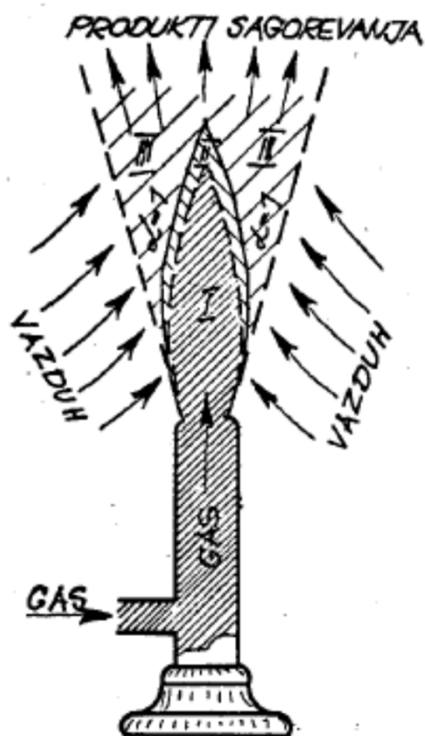
1 – зона хладног дела

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



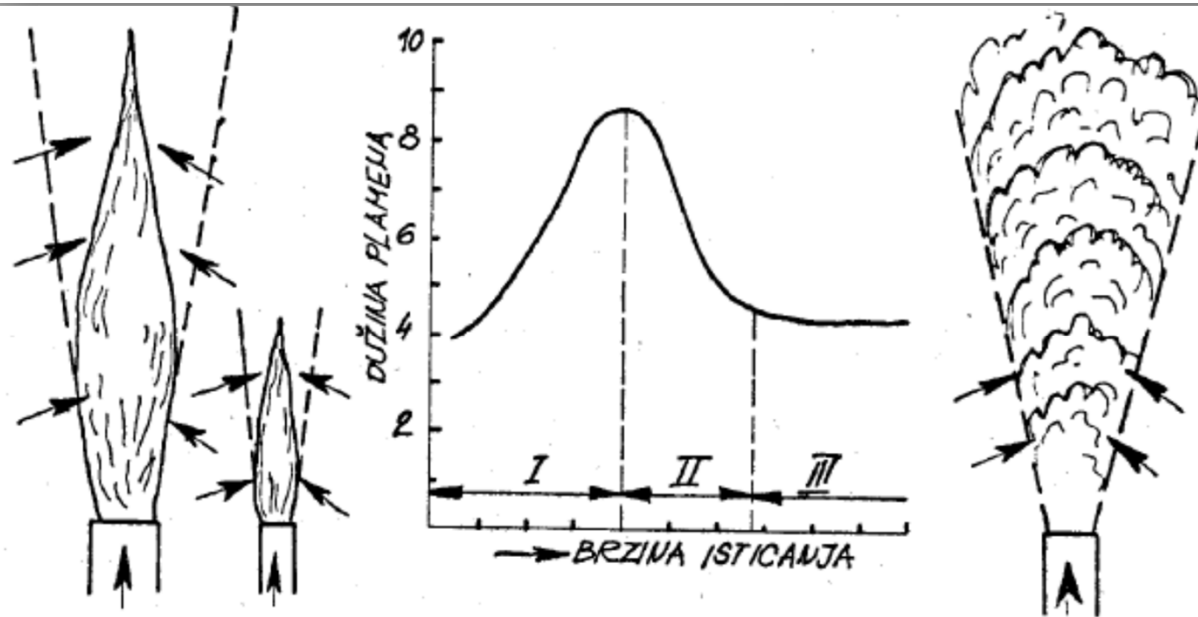
Пресек пламена код дифузионог горионика

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.