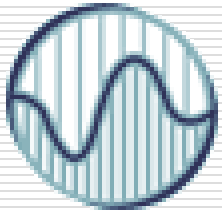


Висока школа електротехнике и  
рачунарства струковних студија

# **СИСТЕМИ ДИРЕКТНОГ УБРИЗГАВАЊЕ БЕНЗИНА**

---

ФОРМИРАЊЕ СМЕШЕ



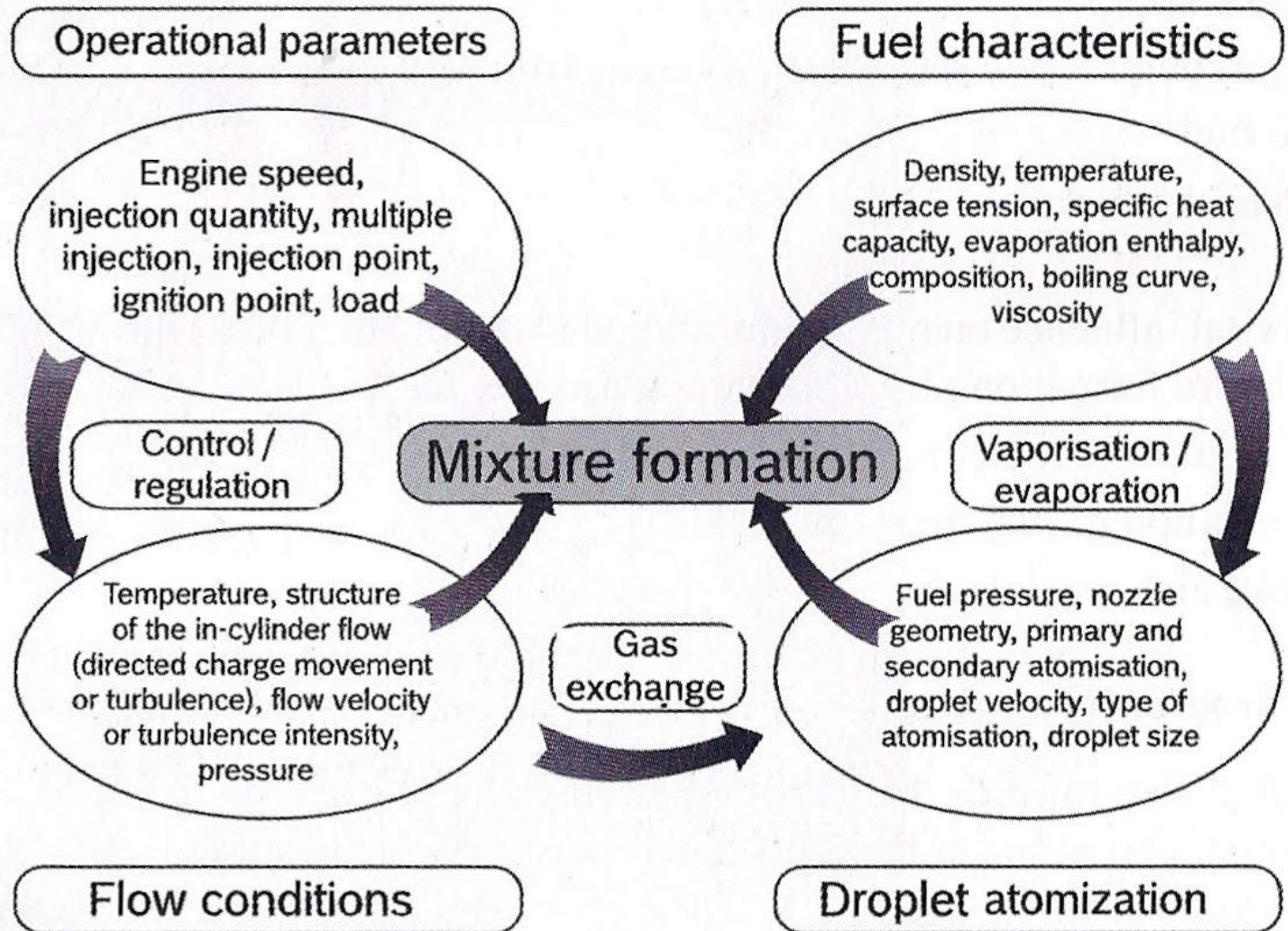
# Утицајни параметри на формирање смеше

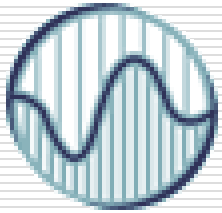
---

- Висок квалитет смеше у читавом радном опсегу је основни предуслов за поуздано и квалитетно сагоревање са високом ефикасношћу и минмалном емисијом штетних гасова.
- Ово се односи и на хомогону и на слојевиту смешу
- Утицајни фактори на квалитет смеше су врло често дијаметрално супротни



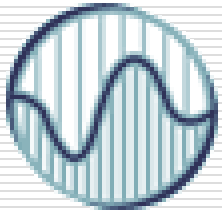
# Утицајни параметри на формирање смеше





---

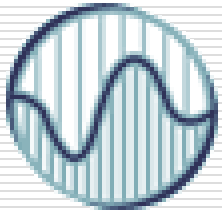
# Пуњење цилиндра



# Пуњење цилиндра

---

- Начин увођења ваздуха у радни простор мотора је од суштинске важности за квалитетно образовање смеше код мотора са директним убризгавањем!
- Висок ниво турбуленције је веома важан за квалитетну смешу, међутим она мора бити строго контролисана код слојевитог образовања смеше.
- Турбулентни ток има следеће карактеристике:
  - Хаотично кретање.
  - Састоји се из већег броја вртлога.
  - Тродимензионалан је.
  - Нестабилан.



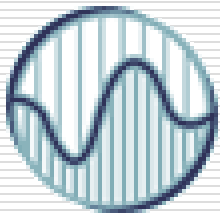
# Пуњење цилиндра

---

Оптимални ток ваздуха зависи од одабраног начина сагоревања и мора се прилагодити одабраном положају брызгача и начину убризгавања горива.

Два основна начина увођења ваздуха у радни простор мотора:

- ❑ **Swirl – вртложењем** - ротација ваздуха око уздужне осе цилиндра мотора или њој паралелне осе
- ❑ **Tumble – тумбањем** – ротација ваздуха око осе која је нормална на уздужну осу цилиндра



# Пуњење цилиндра

---

Величине обе компоненте зависе од:

- ☐ Облика усисног колектора,
- ☐ Односа пречника и хода клипа,
- ☐ Облика коморе за сагоревање.

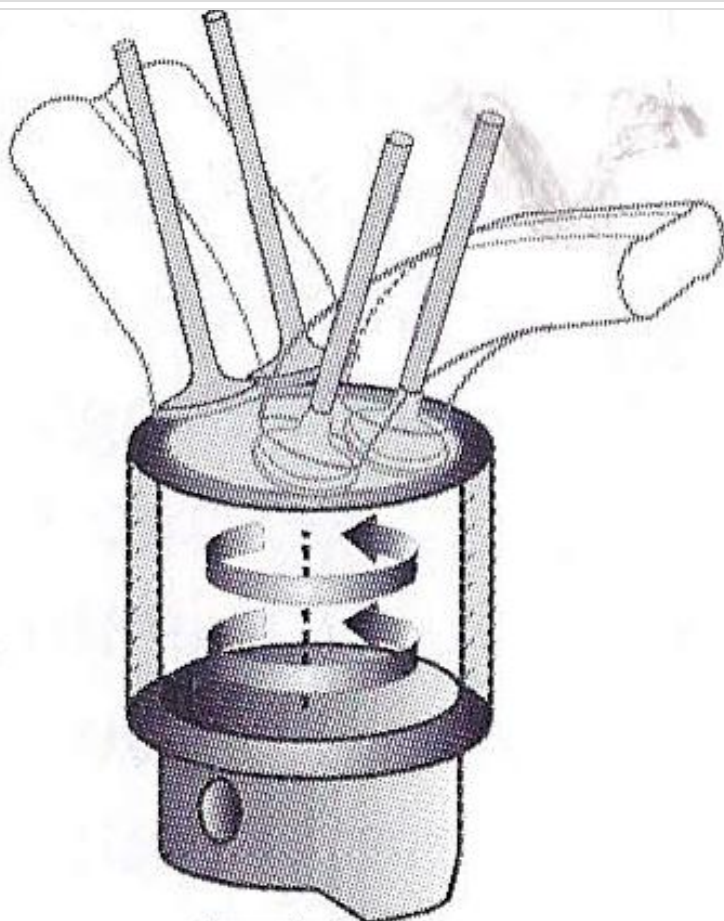
Важно је напоменути да је немогуће обезбедити увођење ваздуха искључиво путем вртложења! Вртложење је увек праћено тумбањем. Уколико је степен тумбања ваздуха велики онда се ради о тзв. **закошеном вртложењу**.

Постоји и кретање ваздуха истискивањем које се јавља у радијалном правцу пред крај такта сабијања. Зависи од облика коморе.

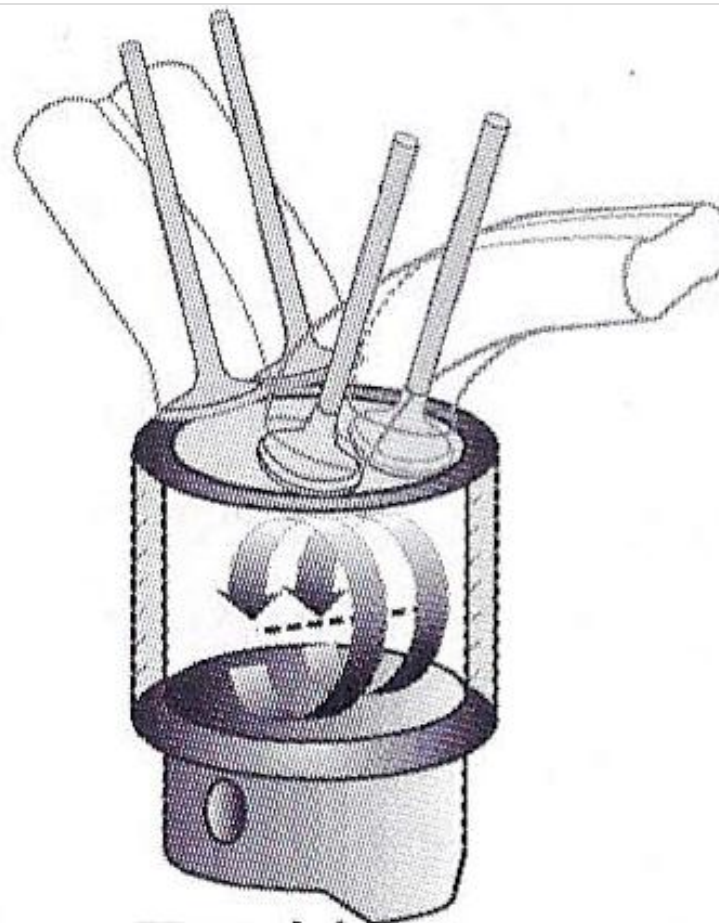


# Различити начини пуњења цилиндра у зависности од усисног колектора

---



Swirl

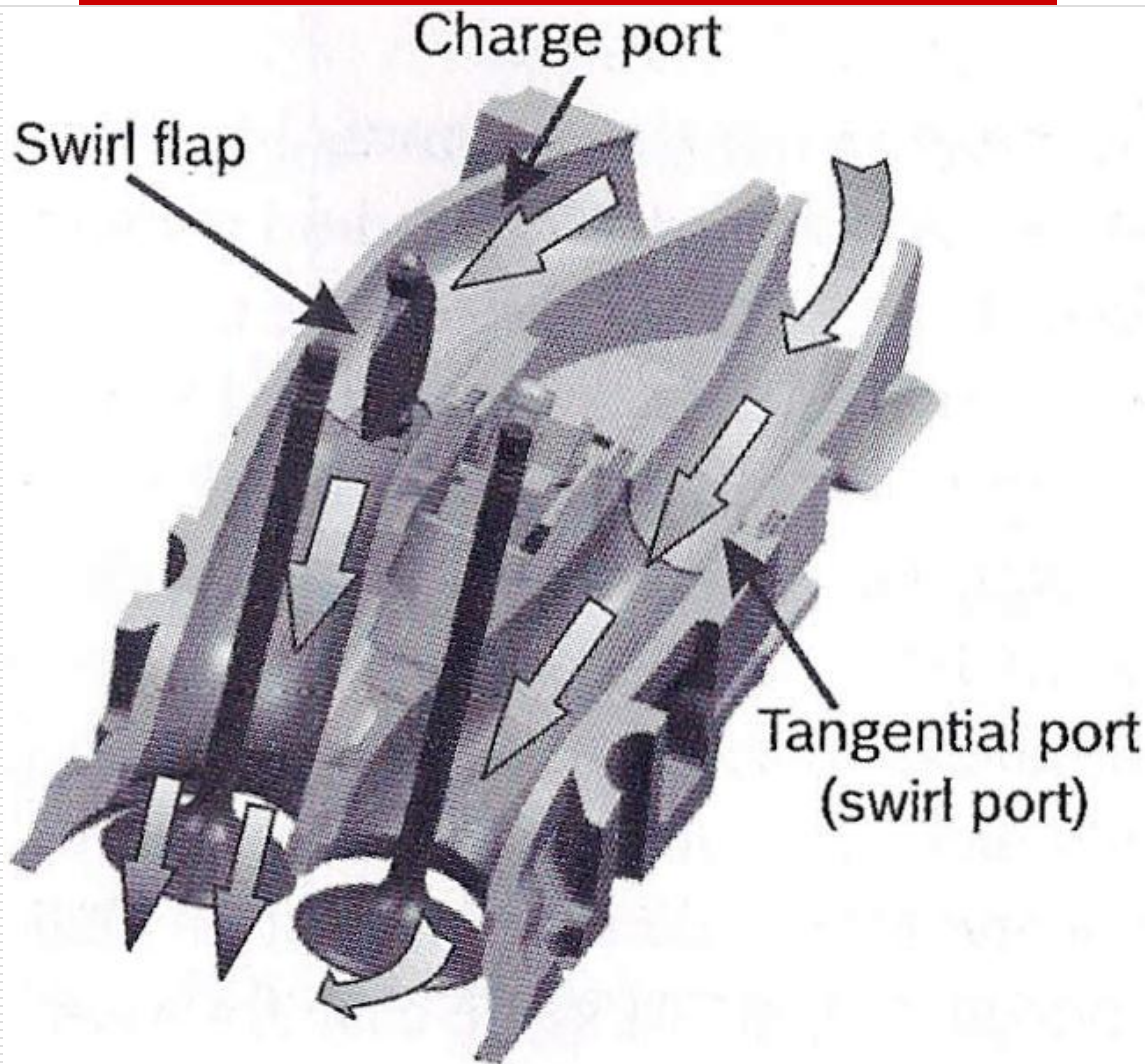


Tumble





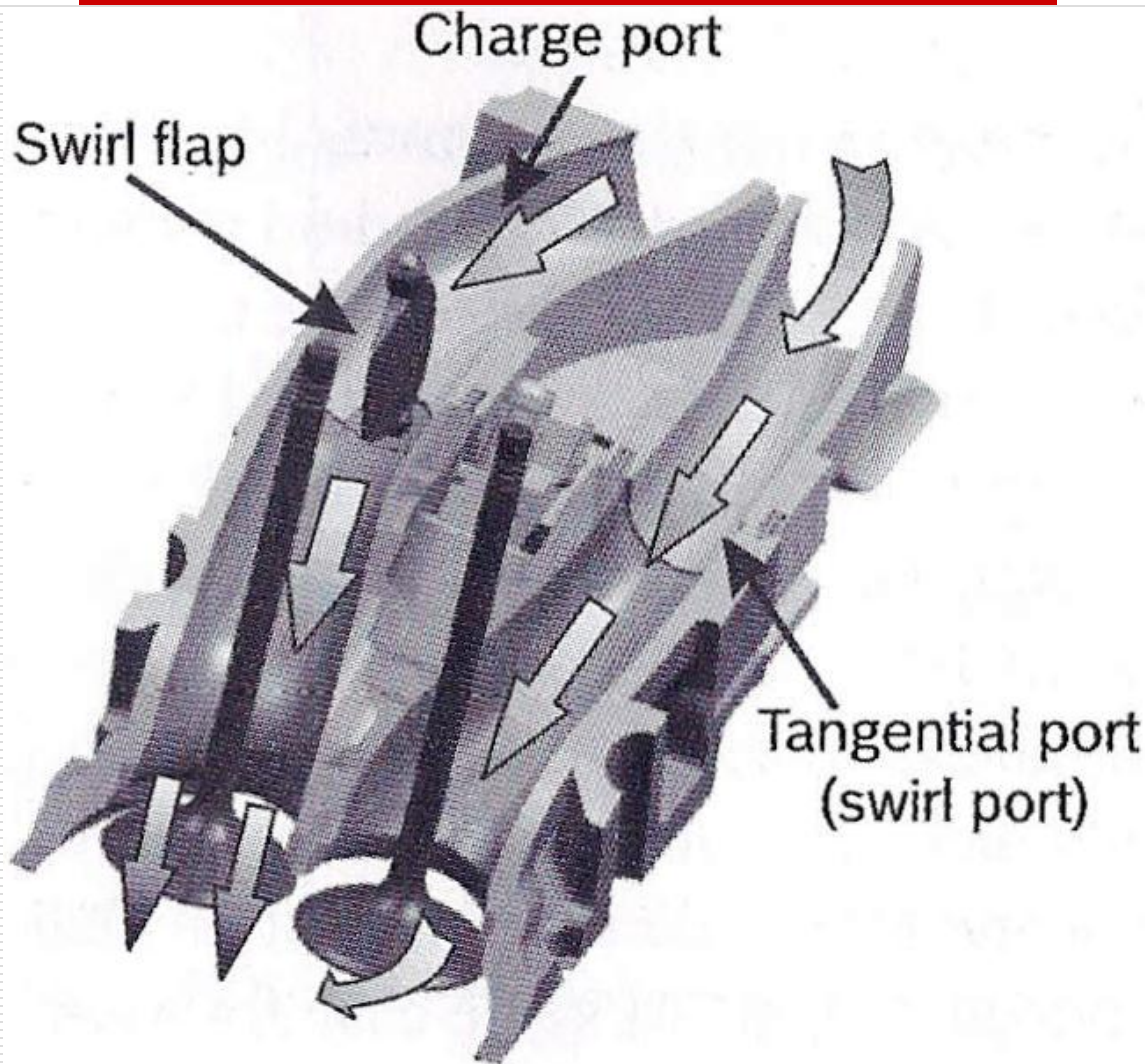
# Swirl flow



Остварује се геометријском модификацијом усног колектора (мора бити асиметричан). Оба канала су отворена на повишеним бројевима обртаја и током рада на пуном оптерећењу како би се повећала запреминска ефикасност.



# Swirl flow

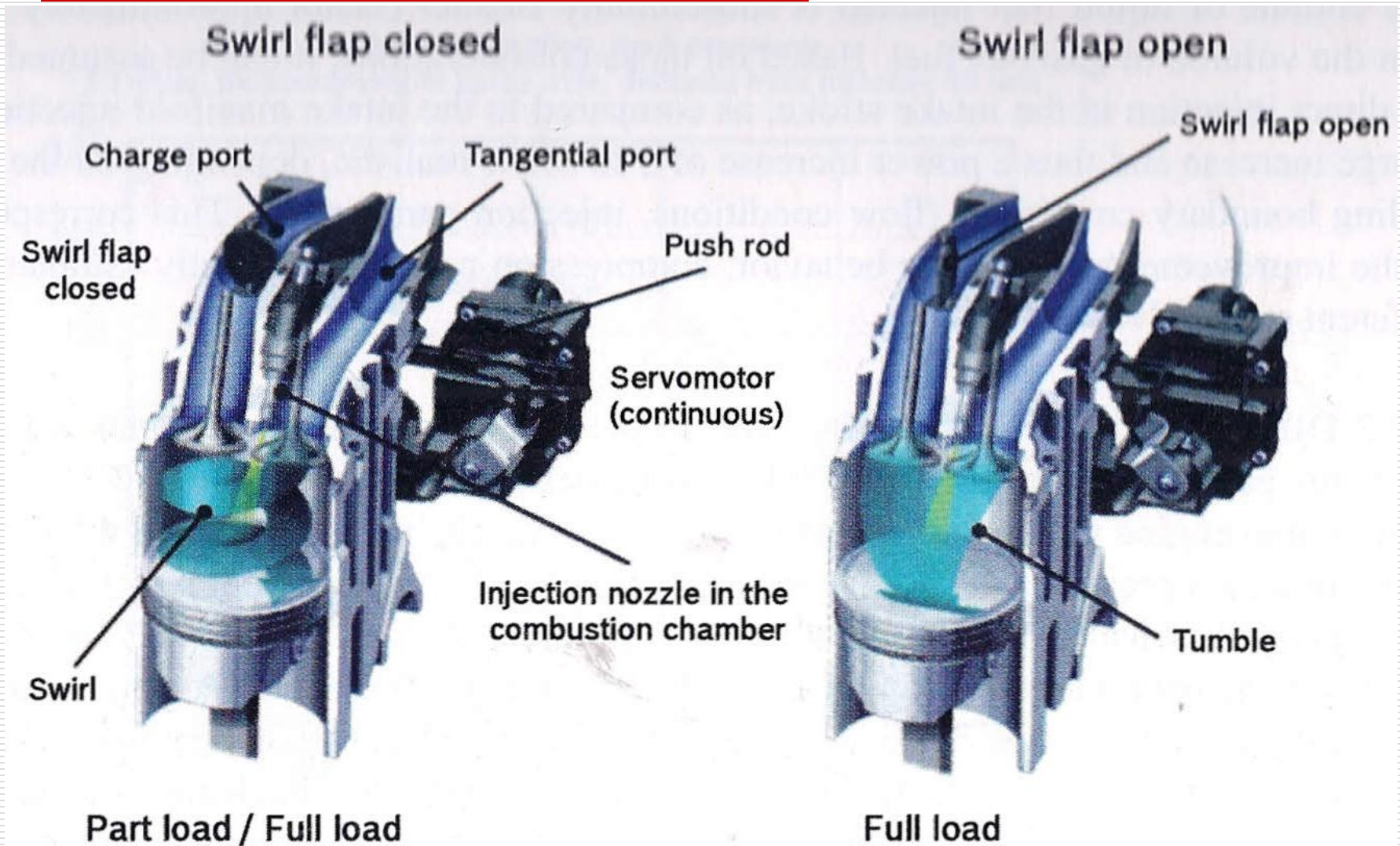


Вртложење се побољшава са повећањем броја обртаја док квалитет убризгавања не зависи од броја обртаја тако да је радни опсег ограничен бројем обртаја мотора.





# Образовање хомогене смеше





# Облик клипа код вртложног типа пуњења

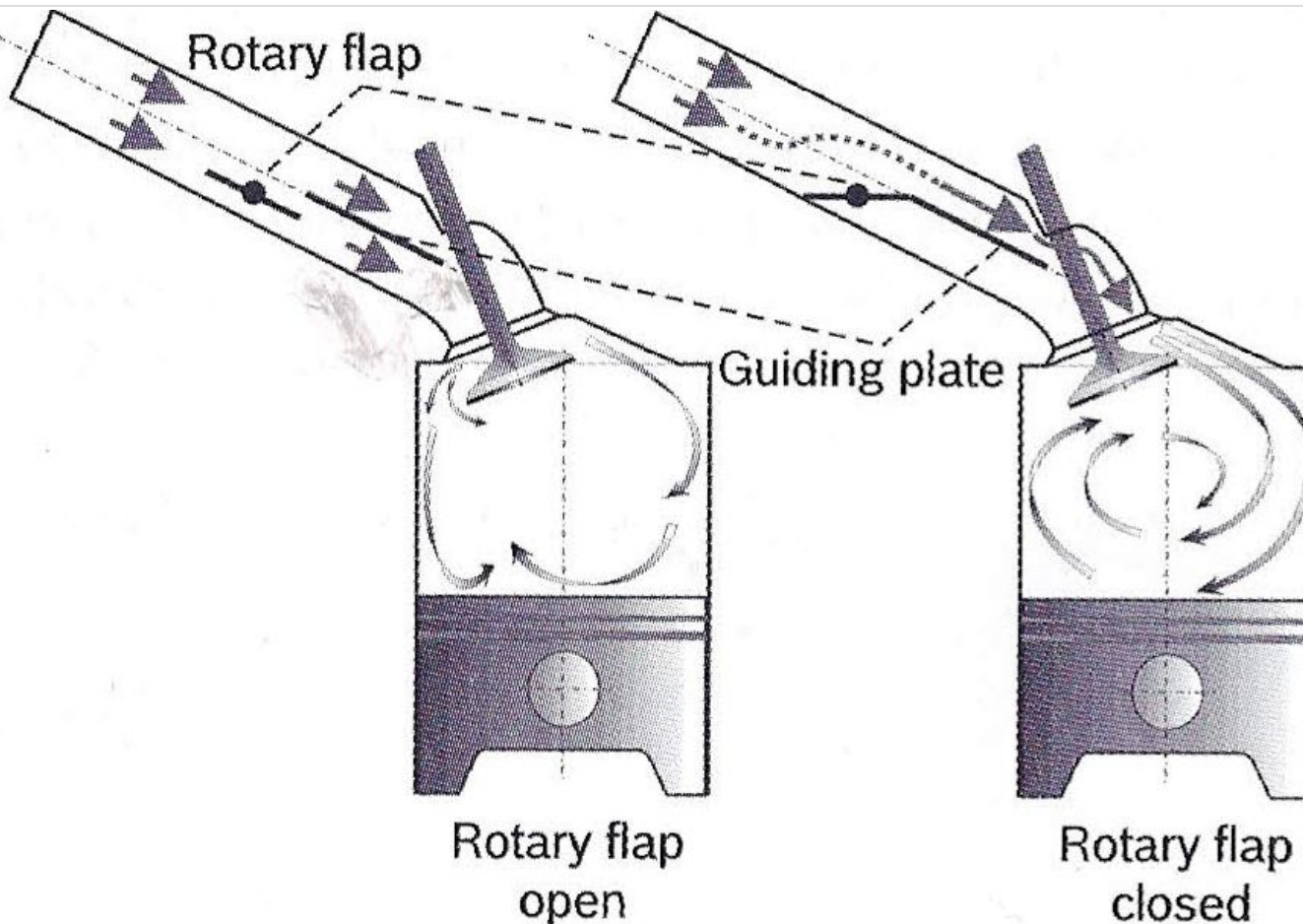
---



Профилисани облик клипа треба да обезбеди истискивање пуњења у близини СМТ-а. Осим овога облик клипа мора да обезбеди одређени степен турбуленције пред крај такта сабијања.



# Tumble flow



Такође захтева модификацију усног колектора. Затварањем клапне ваздух се уводи преко горње стране чиме се ствара ротација око попречне осе цилиндра. Постоје и варијанте са обрнутим тумбањем.



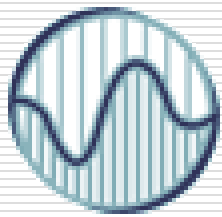


# Облик клипа код пуњење цилиндра тумбањем

---

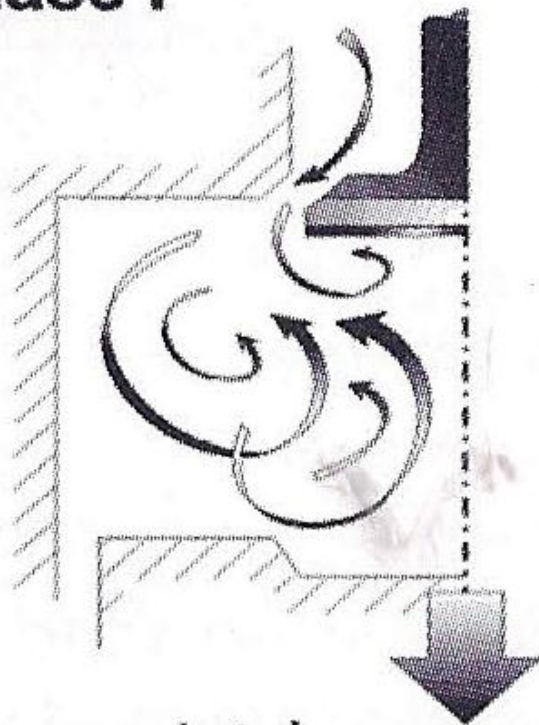


Пуњење тумбањем захтева релативно велико удубљење у челу клипа што може значајно да утиче на процес сагоревања хомогене смеше!



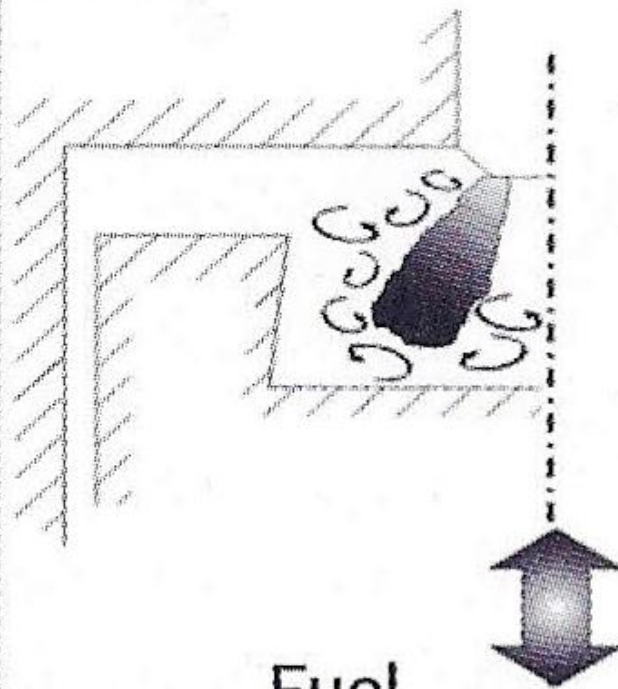
# Различити механизми формирања турбуленције

Phase I



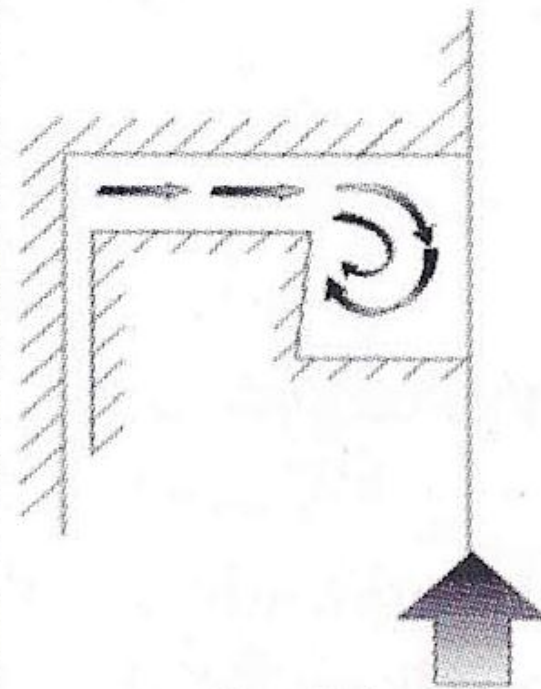
Intake  
process

Phase II



Fuel  
injection

Phase III

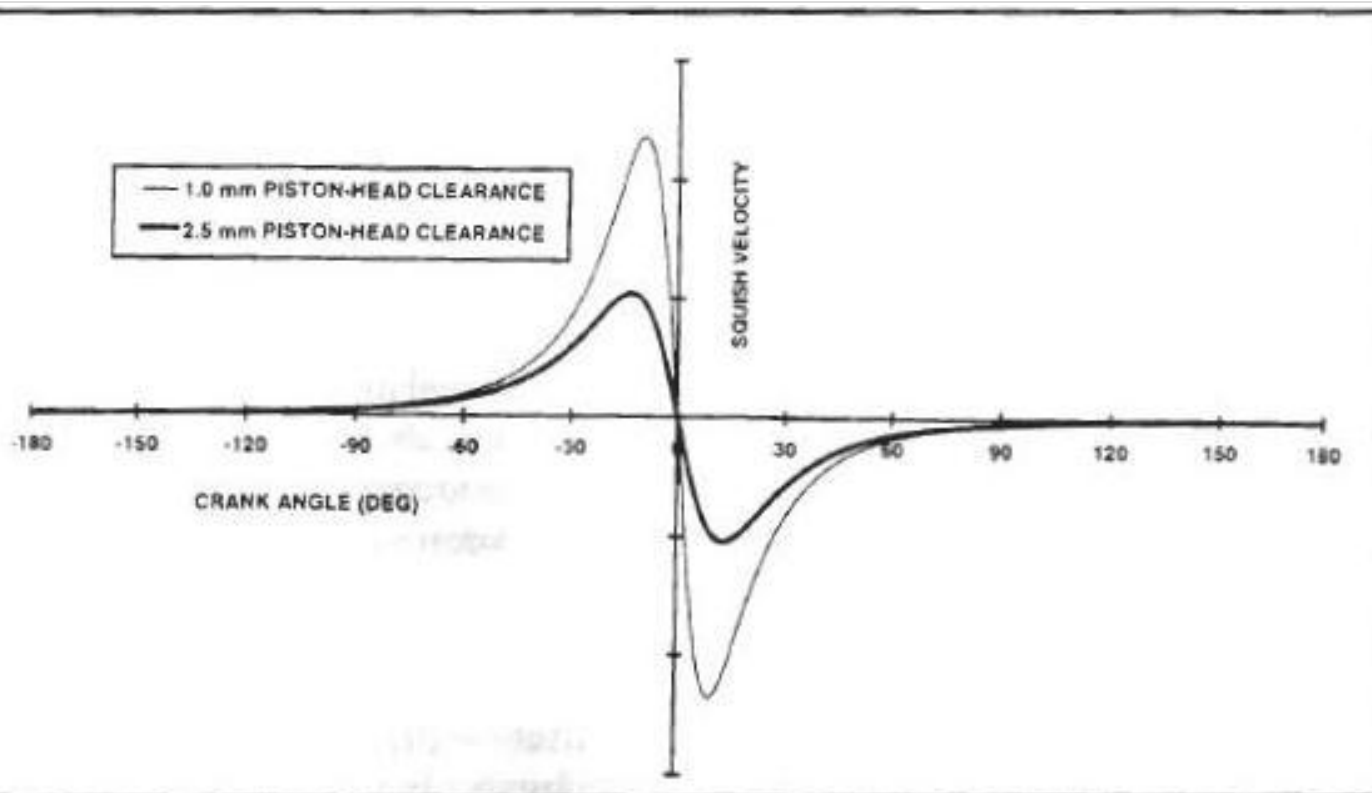


Squish  
flow



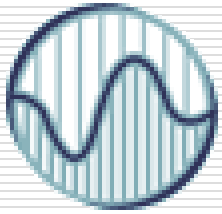
# Различити механизми формирања турбуленције

**Прорачунске вредности брзине  
истискивања за два различита растојања  
чела клипа од главе мотора**



Зона истискивања мора бити прецизно одређена како би се минимизовало задирање горива у њу. Истраживања показују да ефекат истискивања има ограничену примену.





# Пуњење цилиндра

---

Кључни фактори за формирање квалитетног пуњења цилиндра:

- ☐ Средње вредности брзина компонената пуњења,
- ☐ Стабилност средине пуњења,
- ☐ Развој турбуленције током такта сабијања и
- ☐ Средња брзина тока у близини свећице у време паљења.



# Пуњење цилиндра

---

У случају хомогене смеше код мотора са убризгавањем у усисни колектор и код мотора са директним убризгавањем током такта усисавања непоходно је обезбедити висок степен турбуленције и ниску средњу брзину у близини свећице.

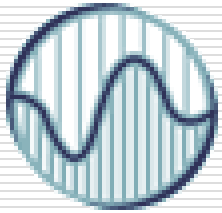
Осим овога структура тока пуњења може трансформисати кинетичку енергију пуњења у енергију турбуленције касно током такта сабијања.



# Пуњење цилиндра

---

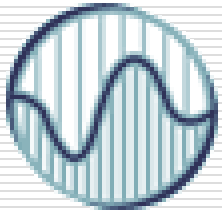
- ❑ Код GDI мотора са касним убризгавањем најбоље је обезбедити пуњење које има вишу средњу брзину кретања пуњења и нижи ниво турбуленције у циљу добијања стабилне слојевите смеше.
- ❑ Оптимални ток пуњења зависи дакле од стратегије убризгавања. Управљање саставом смеше је чак важније од обезбеђења турбуленције.
- ❑ Оба начина пуњења цилиндара и вртложење и тумбање су подједнако заступљени у GDI моторима.



# Пуњење цилиндра

---

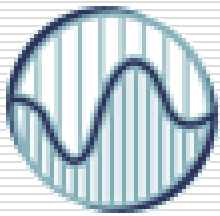
- ❑ Разлике у перформансама код пуњења вртложењем или тумбањем су јако мале.
- ❑ У случају пуњења цилиндра тумбањем језгро горива се одбија од чела клипа и испарења и течна фазе горива се приносе до свећице.
- ❑ Код вртложног пуњења облак смеше је генерално сконцентрисан на периферији чела клипа.
- ❑ Равна комора за сагоревања је погоднија ако се користи пуњење вртложењем.
- ❑ Комора облика крова је погоднија за пуњење тумбањем.



# Пуњење цилиндра

---

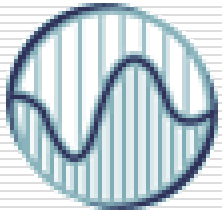
- ❑ Варијабилни начин пуњења се препоручује у циљу добијања бољих перформанси.
- ❑ Мање компликовано је извести варијабилно пуњење вртложењем у односу на пуњење тумбањем. Без обзира на то оба система су подједнако заступљена.



# Пуњење цилиндра

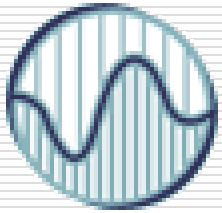
## Карактеристике појединих типова пуњења цилиндра

вртложење	боље одржавање слојевитости
	интезивније је када се комбинује са истискивањем
	зависно је од броја обртаја
	нижи степен варијације између циклуса
тумбање	може се трансформисати у турбуленцију у близини СМТ
	тотална трансформација у турбуленицију једино са равним челом клилпа
	непотпуно трансформација у турбуленцију може да води ка повећању срење брзине пуњења
	погодно за обезбеђење квалитетног испаравања филма горива са зидова коморе
	већи степен варијације између циклуса
укошено вртложење	тенденција ка стварању секундарног тока пуњења што отежава формирање слојевите смеше
	тумбање комбиновано са вртложењем
иситискивање	комбинација карактеристика тумбања и вртложења
	јавља се само у близини СМТ
	мења само масу тока и појачава вртложење или тумбање



---

# Припрема горива

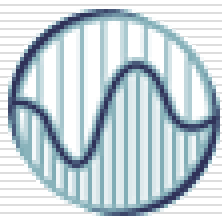


# Припрема горива

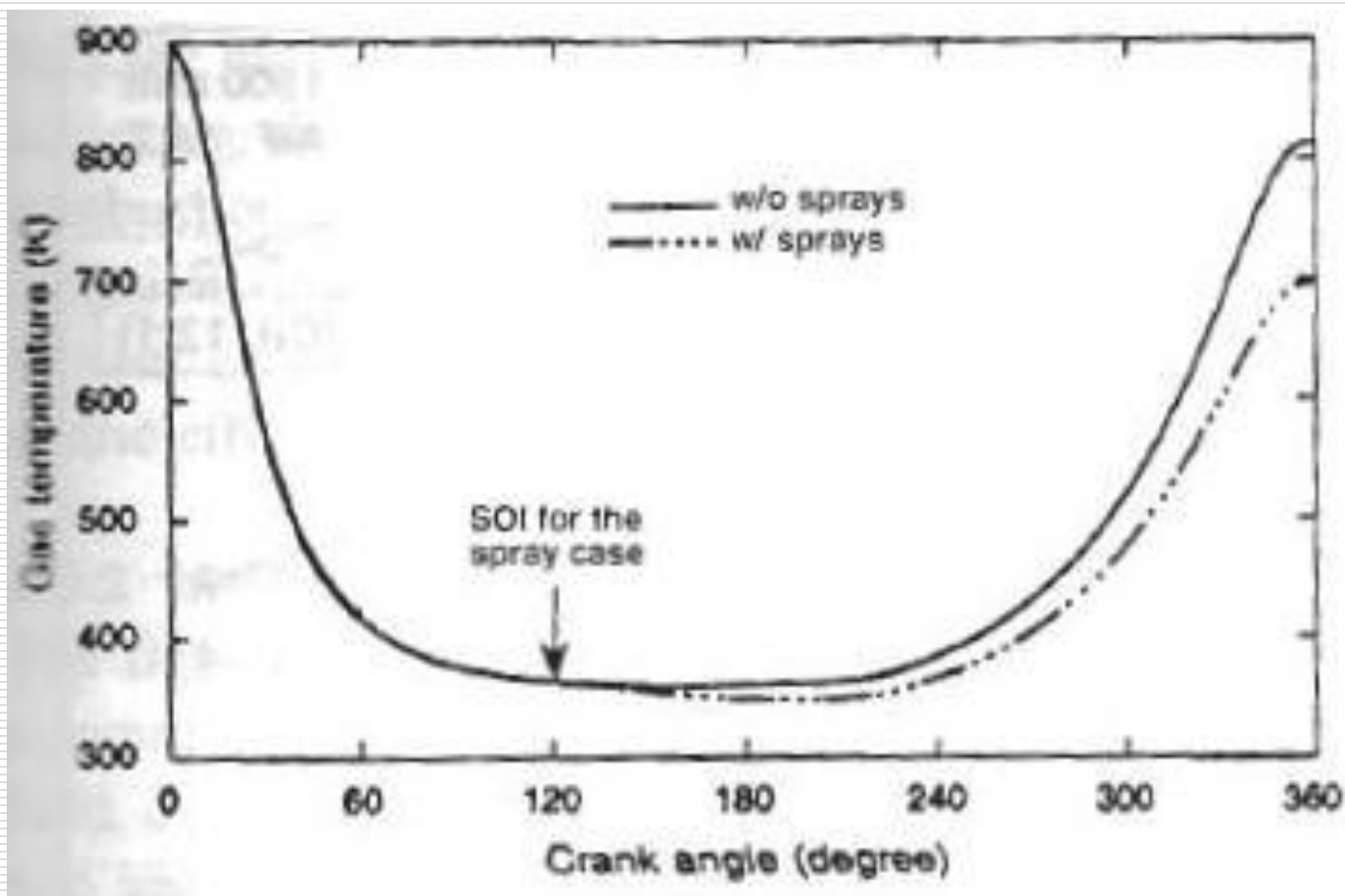
---

- ❑ Атомизација и испаравање горива представљају основу за адекватну припрему горива.
- ❑ У идеалном случају код GDI мотора гориво које је убризгано у радни простор мотора испари комплетно тако што абсорбује топлоту једино из ваздуха који се налази у цилиндру.
- ❑ Са друге стране ово је веома ефикасан начин за хлађење ваздуха у цилиндру чиме се омогућава већи степен пуњења цилиндра уколико се убризгавање одвија током такта усисавања.
- ❑ Смањена температура пуњења на почетку сабијања доводи до мањег захтева по питању октанског броја горива.





# Упоредне вредности промене температуре пуњење током убризгавања и без убризгавања

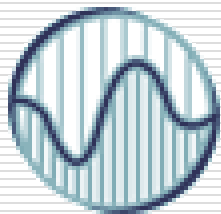




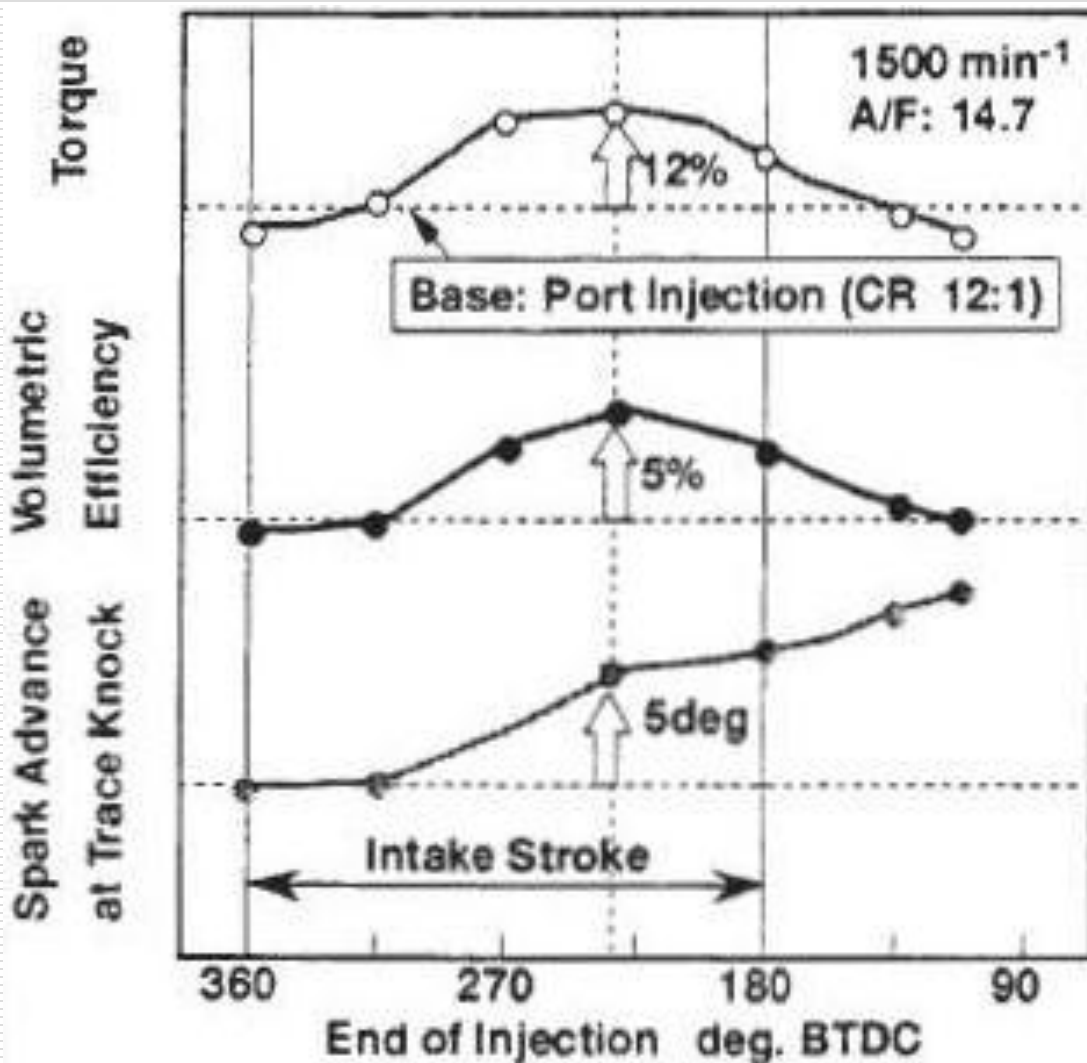
# Припрема горива

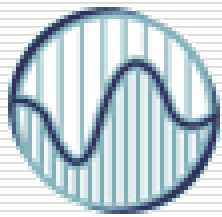
---

- Услед термодинамичких ефеката хлађења пуњења GDI мотори имају значајне предности које се огледају у следећем:
  - Повећана запреминска ефикасност.
  - Смањење температуре на крају такта компресије и смањени топлотни губици.
  - Смањење опасности од самопаљења за исти степен компресије у поређењу са PFI моторима.
  - Могућност рада са већим степеном компресије.

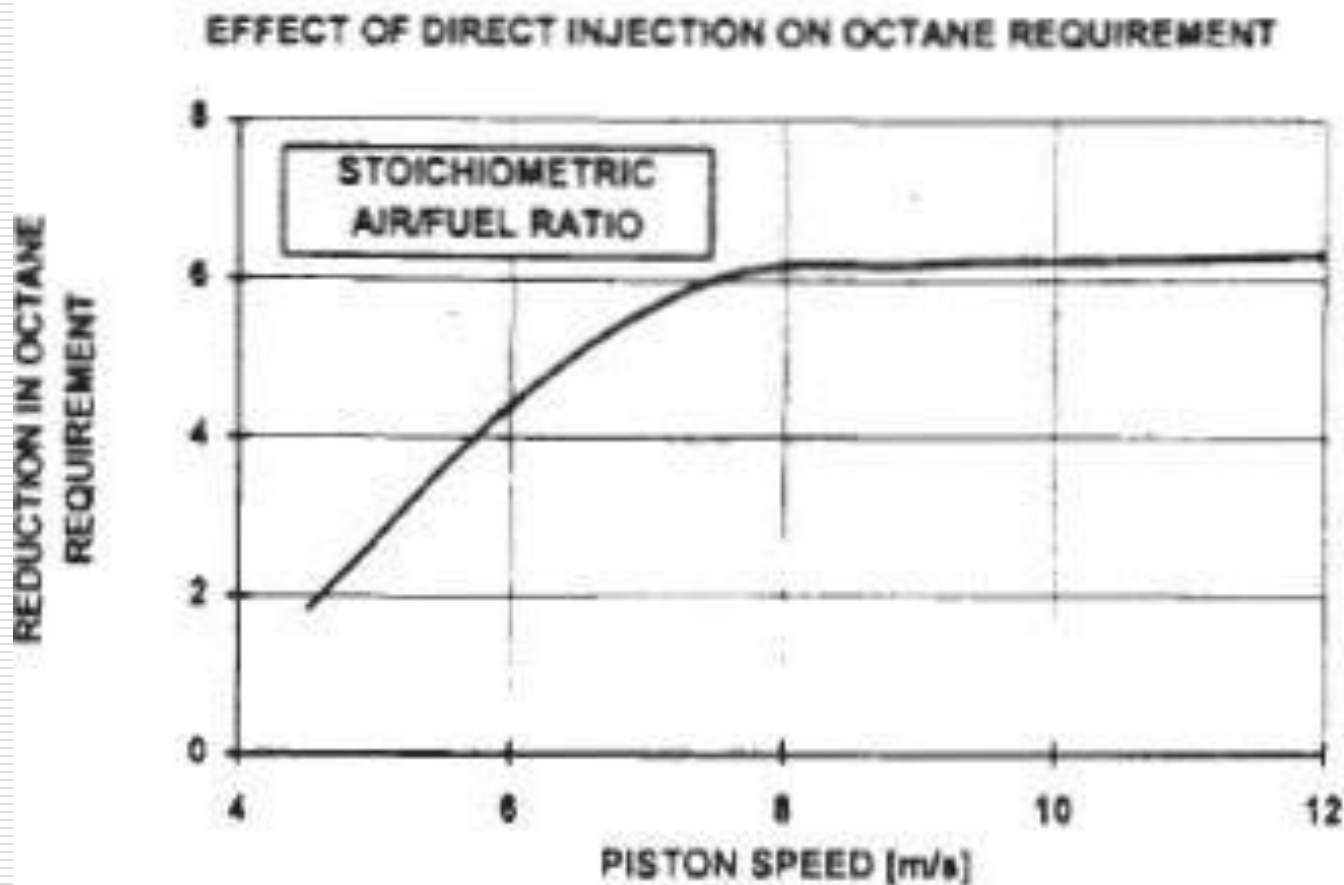


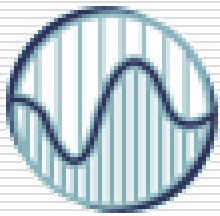
# Припрема горива





# Припрема горива

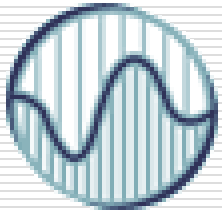




# Припрема горива

---

- Важно је напоменути да запреминска ефикасност опада са померањем убризгавања ка крају такта усисавања
- Незнатни ефекти предности хлађења смеше постоје и ако се убризгавање оствари након затварања усисних вентила
- Са друге стране сувише рано убризгавање (на почетку такта усисавања) омогућава стварање филма горива на челу клипа. Овај ефекат омогућава добро хлађење клипа али смањује ефекат хлађења пуњења

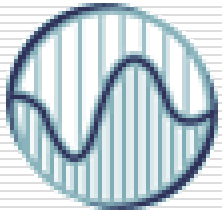


# Припрема горива

---

Атомизација и испаравање горива представљају основу за адекватну припрему горива. Мала величина капи горива обезбеђује се:

- ☐ Малим пречником отвора бризгача
- ☐ Високим притиском убризгавања
- ☐ Високом густином ваздуха
- ☐ Малом вискозношћу горива
- ☐ Малим површинским напоном горива

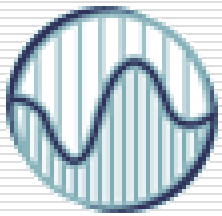


# Припрема горива

---

Када млаз прође кроз брызгача формирање смеше се одвија кроз следеће фазе:

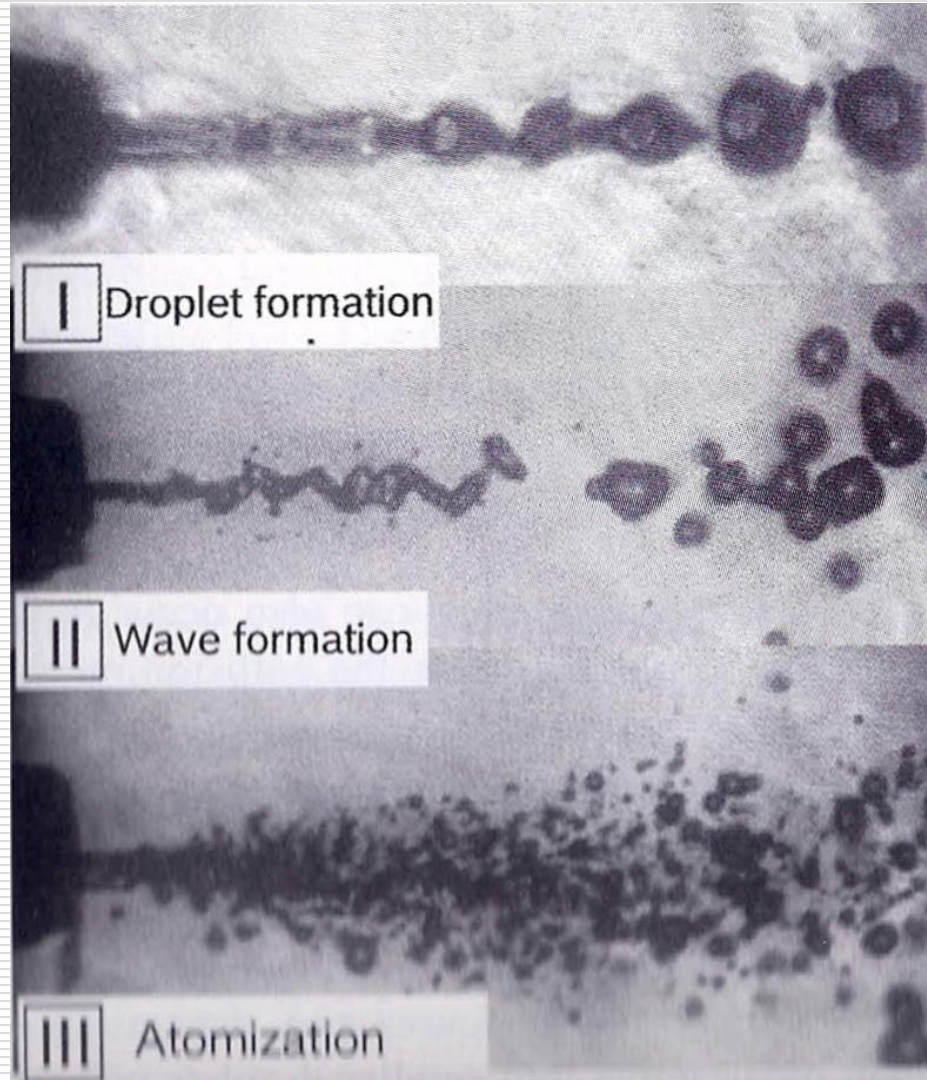
- ☐ Прекидање млаза и формирање капљица
- ☐ Испаравање капљица
- ☐ Мешање горива са уисаним ваздухом



# Припрема горива

Раздвајање (прекидање) млаза горива се може одвијати на три начина и зависи од брзине кретања горива:

- ☐ Формирање капљица
- ☐ Формирање таласа
- ☐ Атомизација





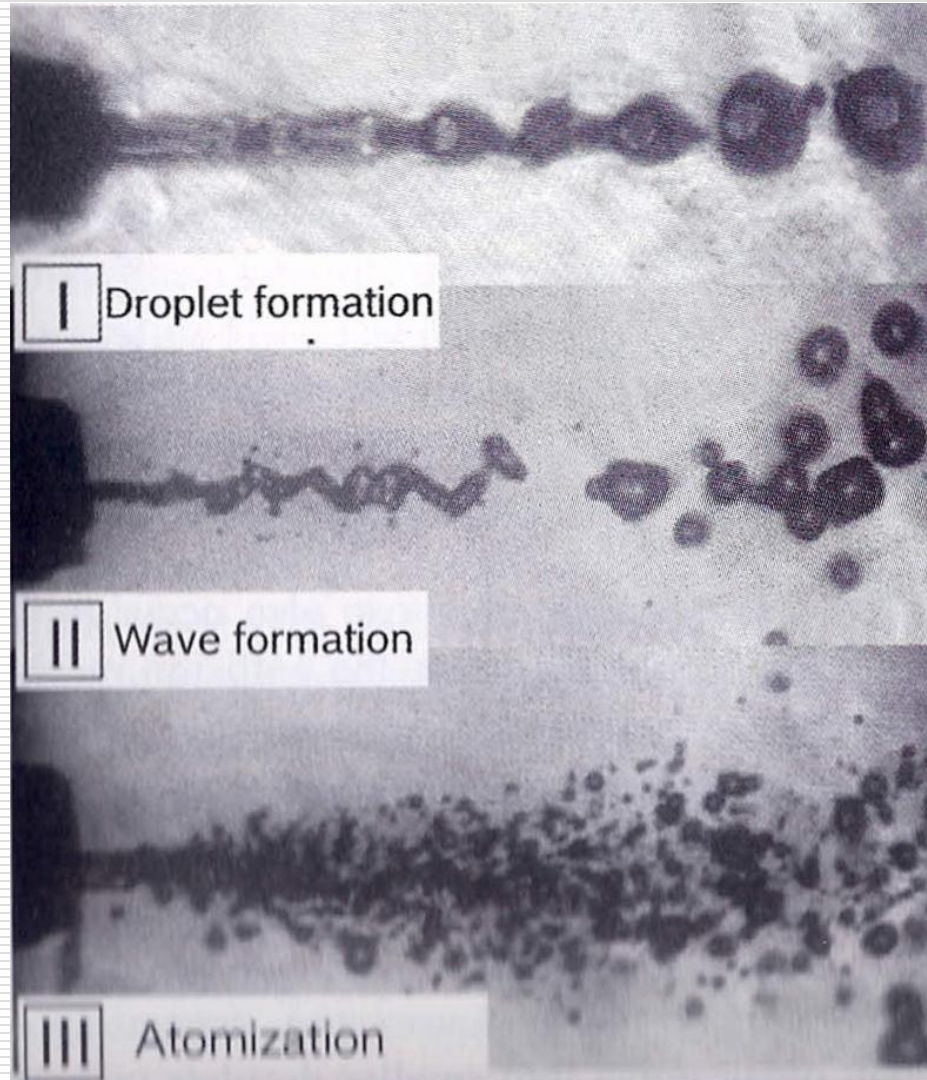


# Припрема горива

I на нижим брзинама површинске силе горива су доминантне што резултује стварањем капљица.

II повећањем брзине аеродинамичке силе које делују на млаз горива се такође повећавају и долази до стварање таласа.

III велике брзине млаза доводе до атомизације горива.

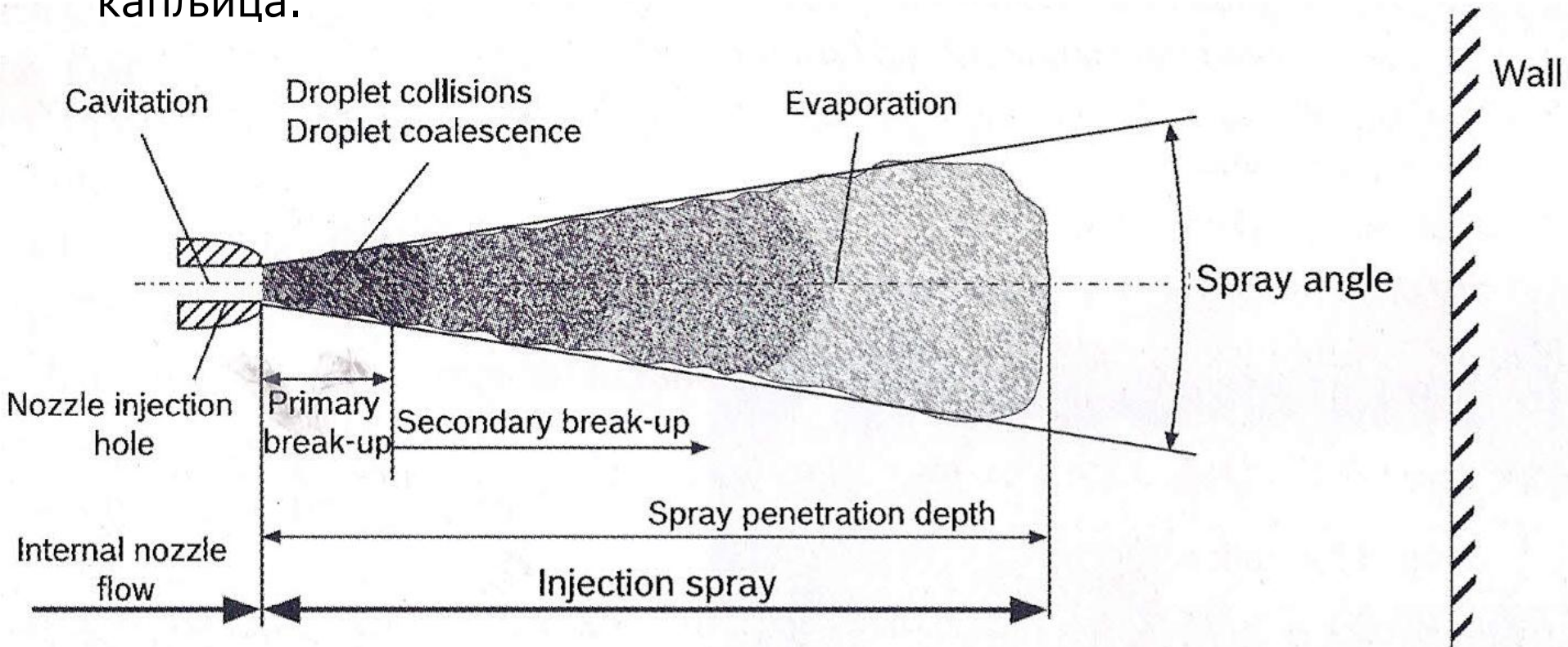




# Зоне раздвајања млаза горива

Процес раздвајања млаза током убризгавања се може поделити у две различите зоне:

- Примарни прекид. Унутар или у непосредној близини изван бризгача. Млаз још увек континуалан, почиње формирање капљица.

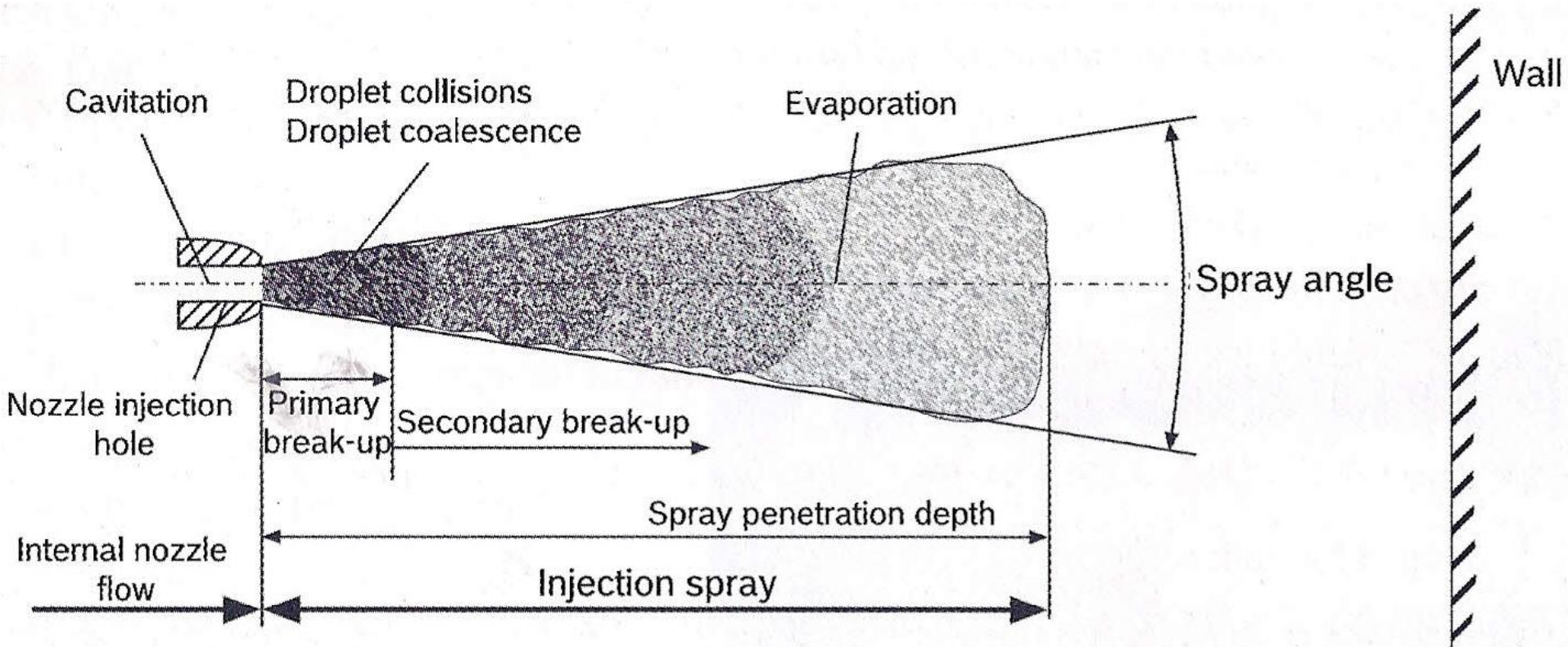




# Зоне раздвајања млаза горива

Процес раздвајања млаза током убризгавања се може поделити у две различите зоне:

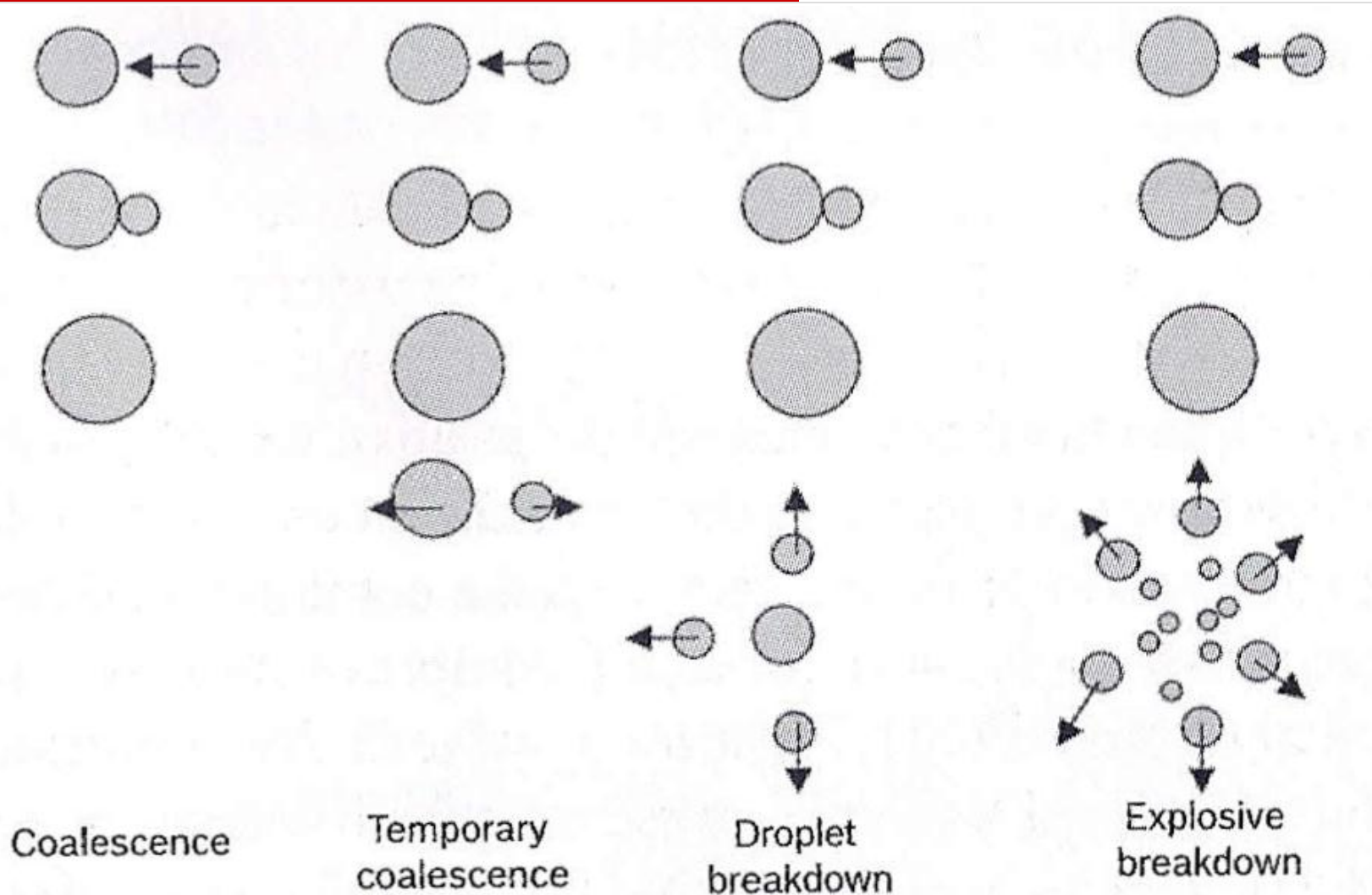
- ❑ Секундарни прекид. Даље од брзигача. Разређивање млаза горива ваздухом, формирање капљица и почиње испаравање.

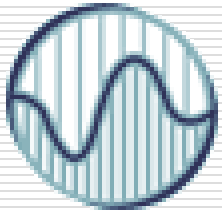






# Механизми спајања и раздвајања капи горива



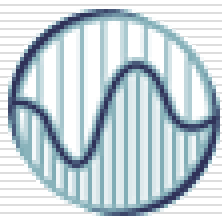


# Зоне раздвајања млаза горива

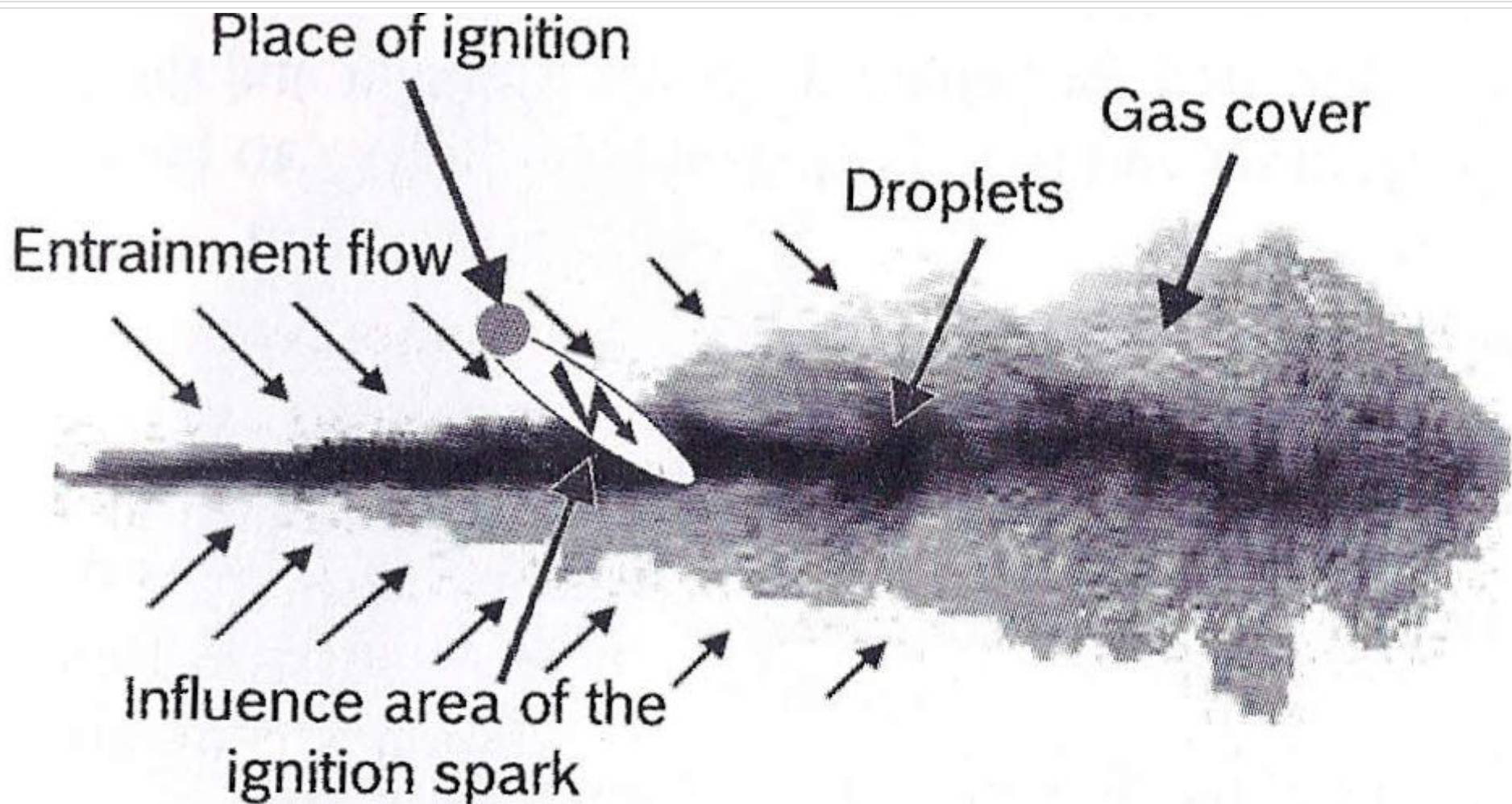
---

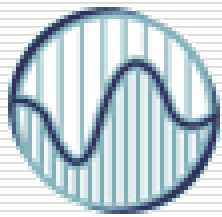
Током процеса испаравања прелаз из течне у гасовиту фазу горива мора да се одвије у веома кратком временском интервалу. На процес испаравања утичу следећи фактори:

- ☐ Потенцијал за испаравање у околину (разлика температура горива и околине).
- ☐ Квалитет атомизације.
- ☐ Трансфер масе у околину.

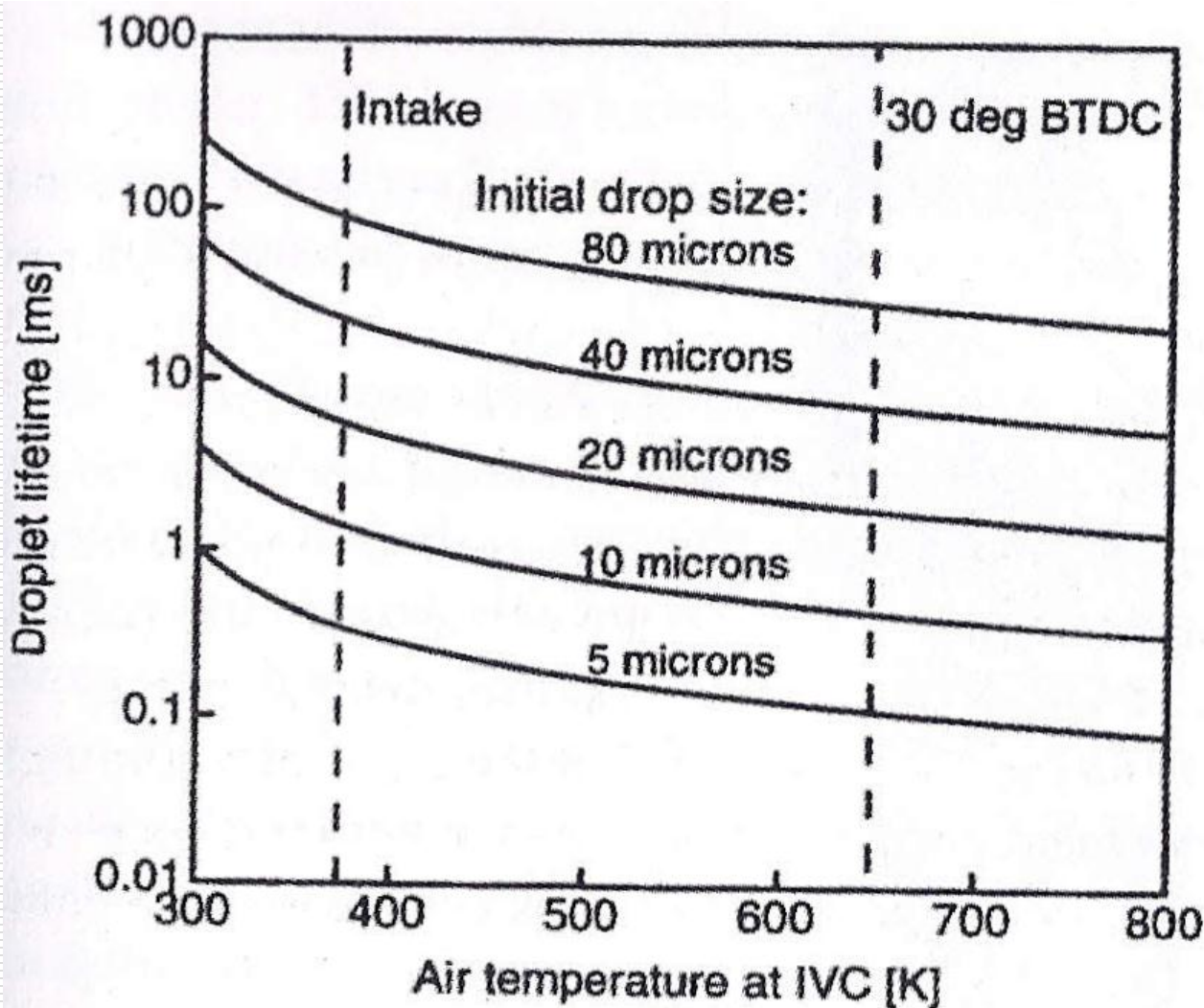


# Месђусобни утицај млаза и околине





# Утицај величине капљице горива и температуре ваздуха на трајање капљице

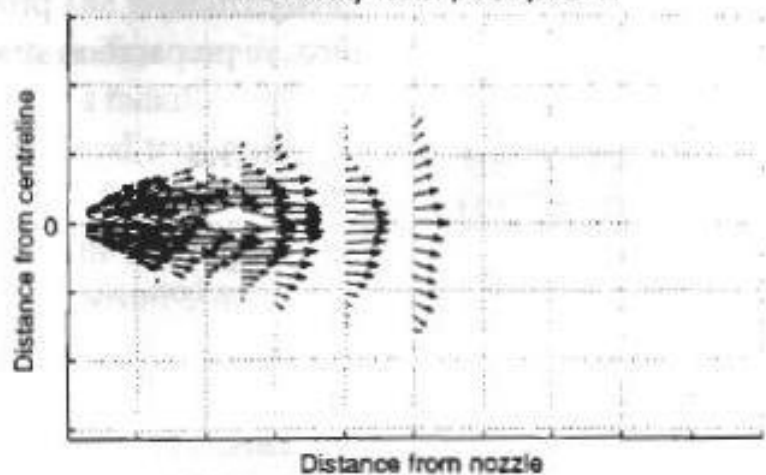




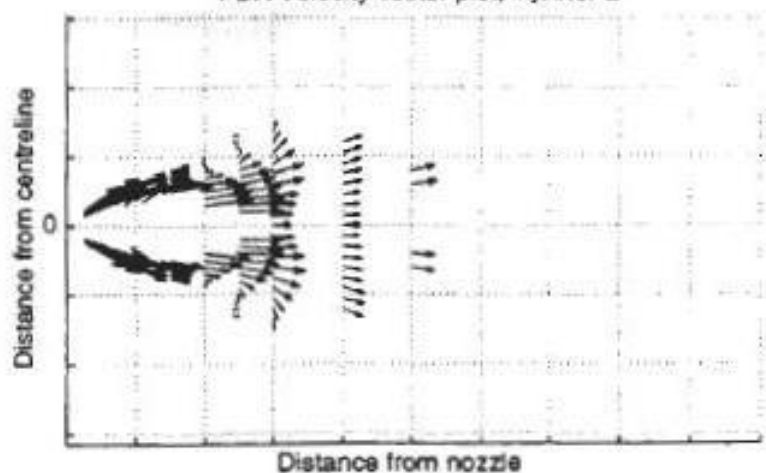


# Утицај облика млаза на емисију НС

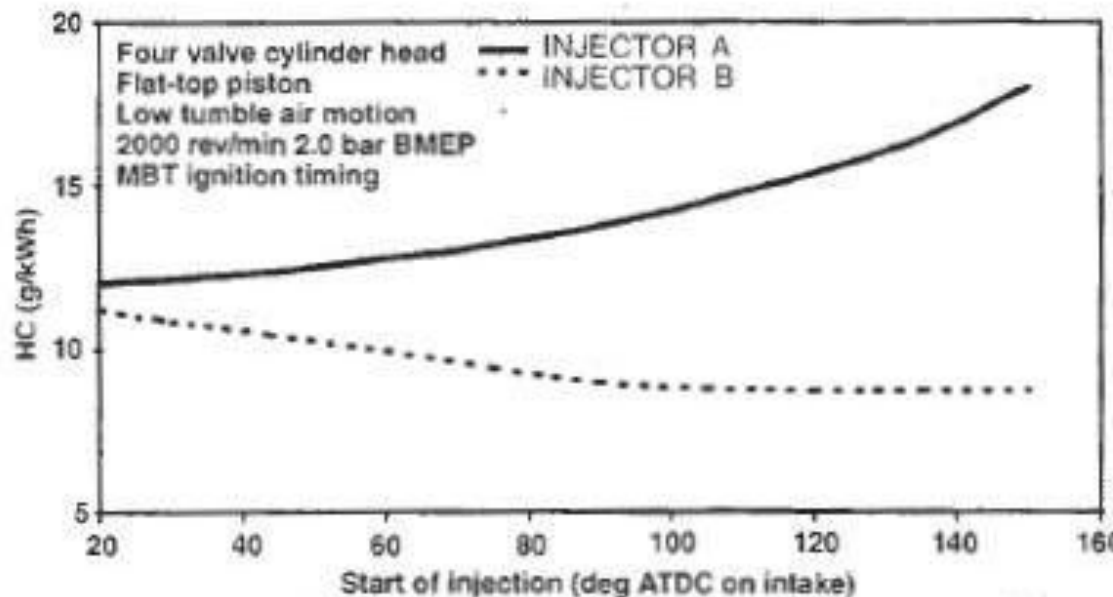
PDA Velocity vector plot, injector A



PDA Velocity vector plot, injector B



A – малз облика пуног конуса  
B – млаз облика шупљег конуса







# Припрема горива

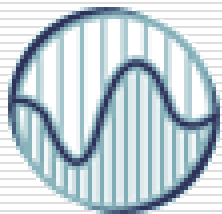
---

- ❑ Комплексна временска зависност убризгавања и кретања ваздуха ако интеракција између убризгавања и зидова коморе за сагоревање одређују однос горива и ваздуха и степен слојевитости смеше.
- ❑ Веома је тешко генерализовати карактеристику смеше у цилиндру јер је квалитет и састав смеше веома зависан од облика коморе за сагоревање, геометрије млаза, кретања ваздуха у цилиндру, стратегије убризгавања.

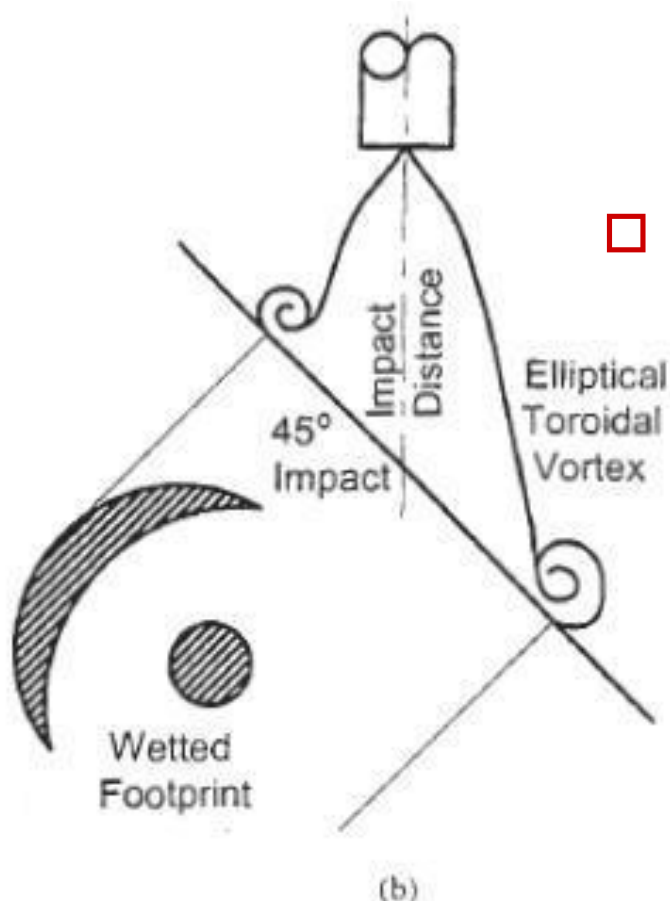
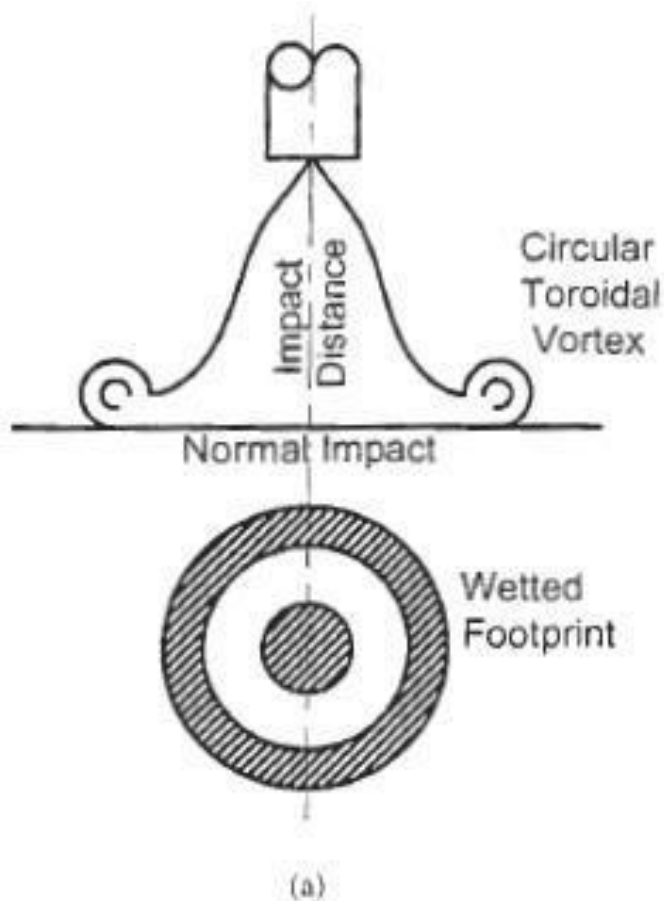


# Услови за припрему оптималне смеше

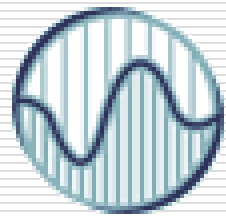
Захтеви у односу на бризгач и карактеристике млаза	одговарајући угао конуса млаза у циљу обезбеђења доброг искоришћења ваздуха код раног убризгавања као и избегавања "квашења" зидова коморе за сагоревање изван удубљења на клипу
	одговарајуће продирање млаза у циљу обезбеђења доброг мешања са ваздухом уз избегавања контакта са зидовима коморе
	минимална запремина у бризгачу и без пост убризгавања
	чисто затварање без капљица већих од 60 $\mu m$
	стабилно убризгавање малих количина горива
Време убризгавања	рано убризгавање би требало да обезбеди хлађење усисаног ваздуха
	врх млаза сме само да "јури" за челом клипа без претераног формирања филма горива
	што касније убризгавање у циљу смањења претеране дифузије горива
	раније убризгавање уз могућност поузданог упаљења рад избегавање дима
Облик коморе	облик коморе који подразумева и облик чела клипа мора да буде такав да задовољи захтев по питању положаја бризгача и свећице, геометрије млаза и орјентације млаза
	вртложење и тумбање пуњења мора бити оптимизовано за читав опсег и све режиме рада мотора



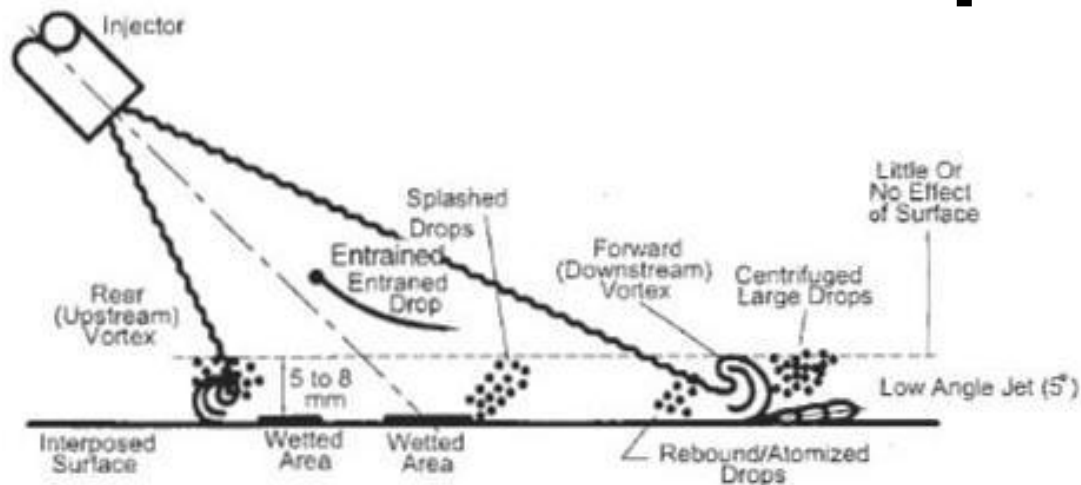
# Интеракција између млаза горива и површине коморе за сагоревање



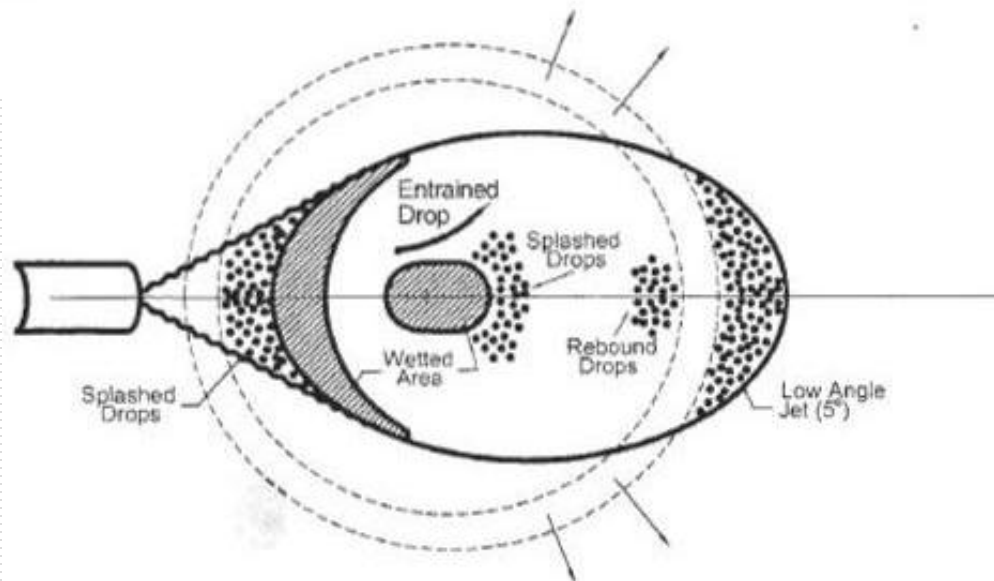
- Интеракција је динамичка и временски зависна.
- Површина може бити сува или влажна, на њој се могу налазити насlage или не, топла или хладна



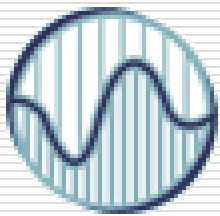
# Интеракција између млаза горива и површине коморе за сагоревање



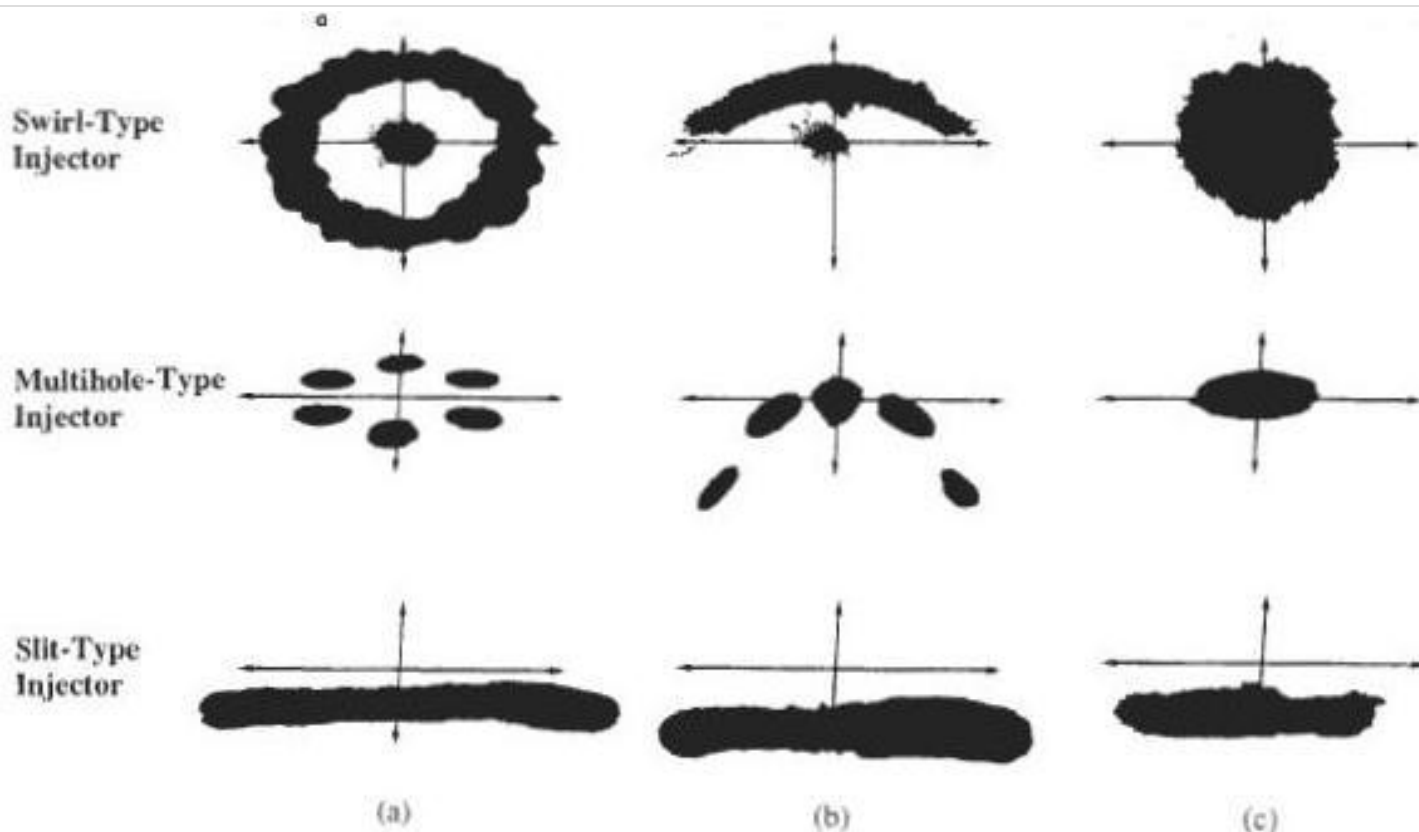
(a)



(b)



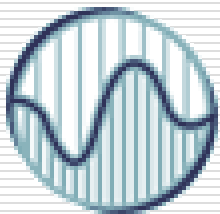
# Влажни отисци за различите типове брызгача



А – вертикално постављен брызгач

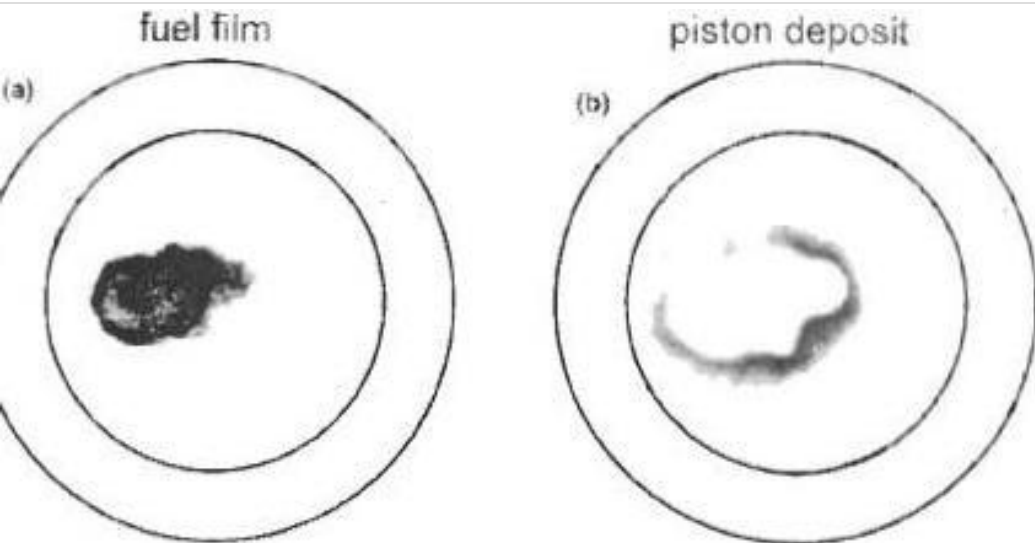
В – брызгач под углом од  $45^\circ$

С – вертикално постављаен брызгач са врелим брызгачем и врелим горивом



# Влажни отисци за различите типове брызгача

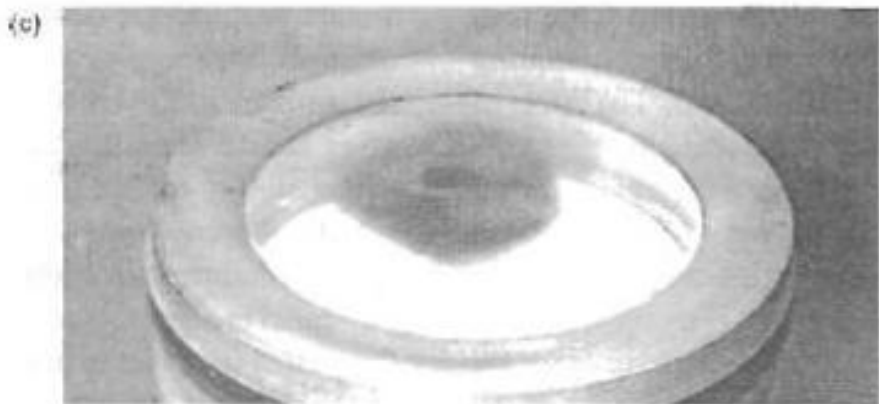
---

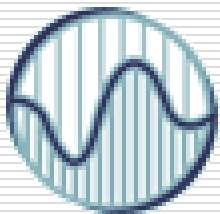


**а** – филм горива на клипу  
65° након урбизгавања.

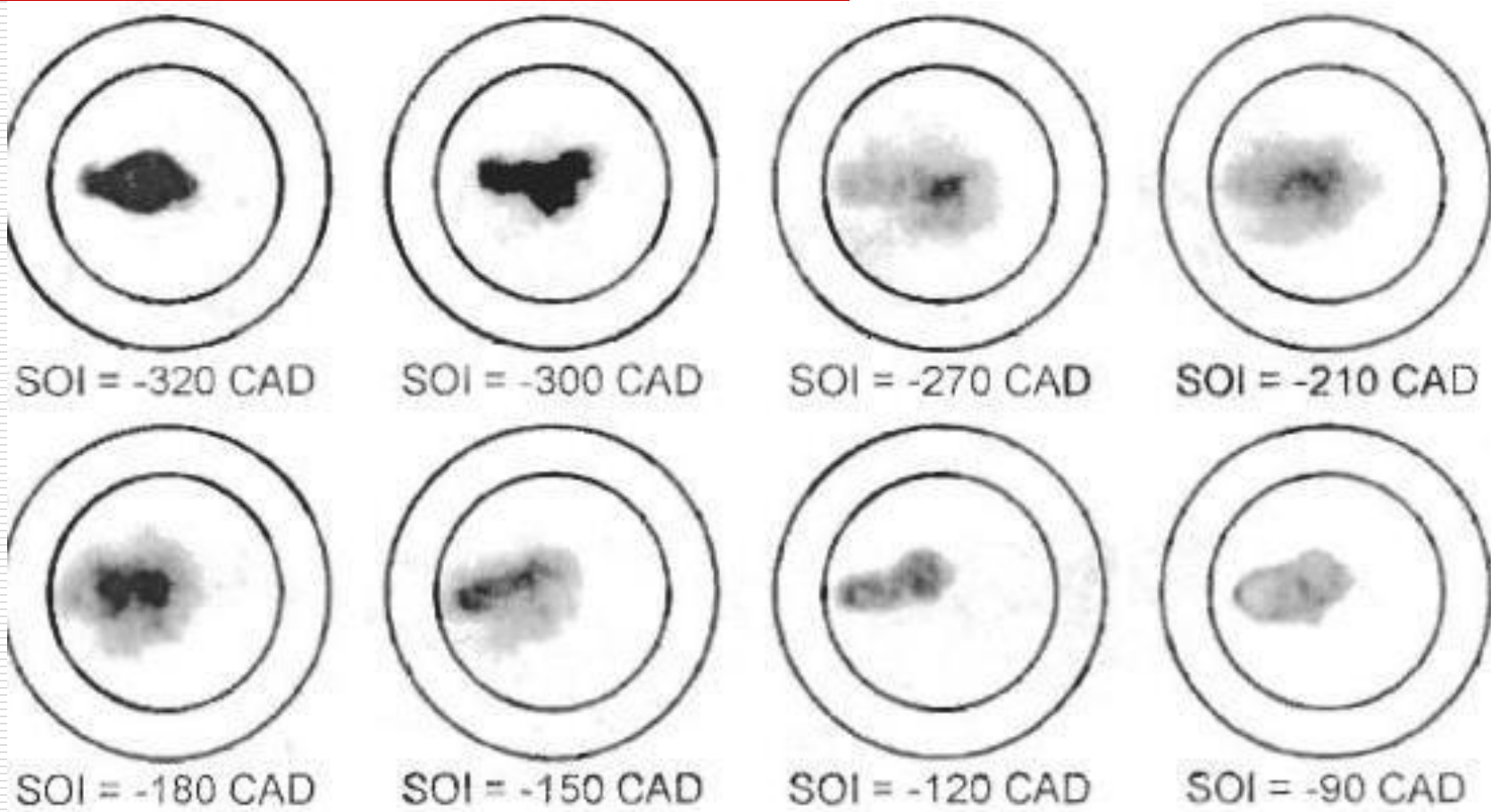
**в** – наслаге на клипу након  
100 циклуса.

**с** – наслаге на клипу након  
неколико хиљада циклуса.





# Влажни отисци за различите типове брызгача

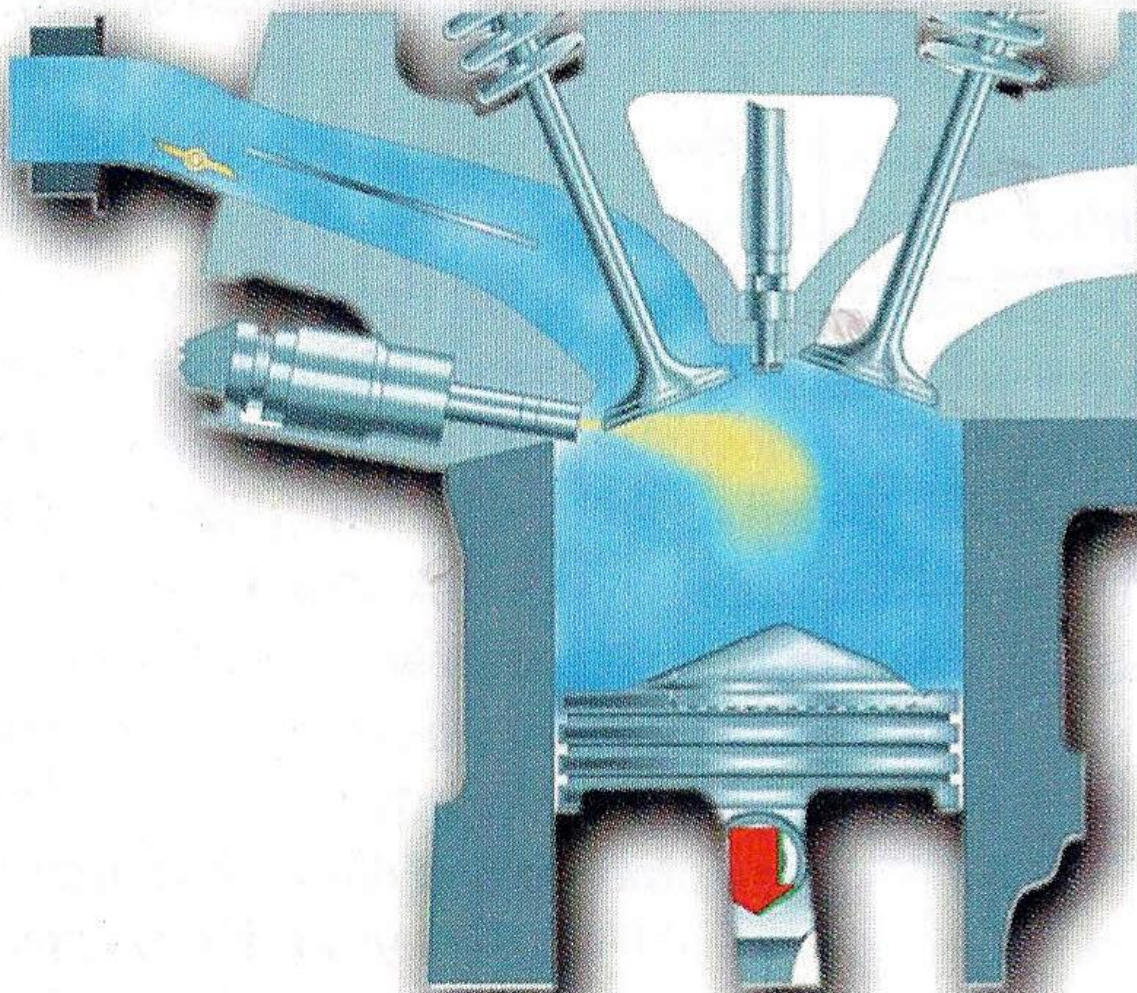


Формирање филма горива на клипу у функцији времена убризгавања. Централно постављени 30° вртложни брызгач





# Образовање хомогене смеше



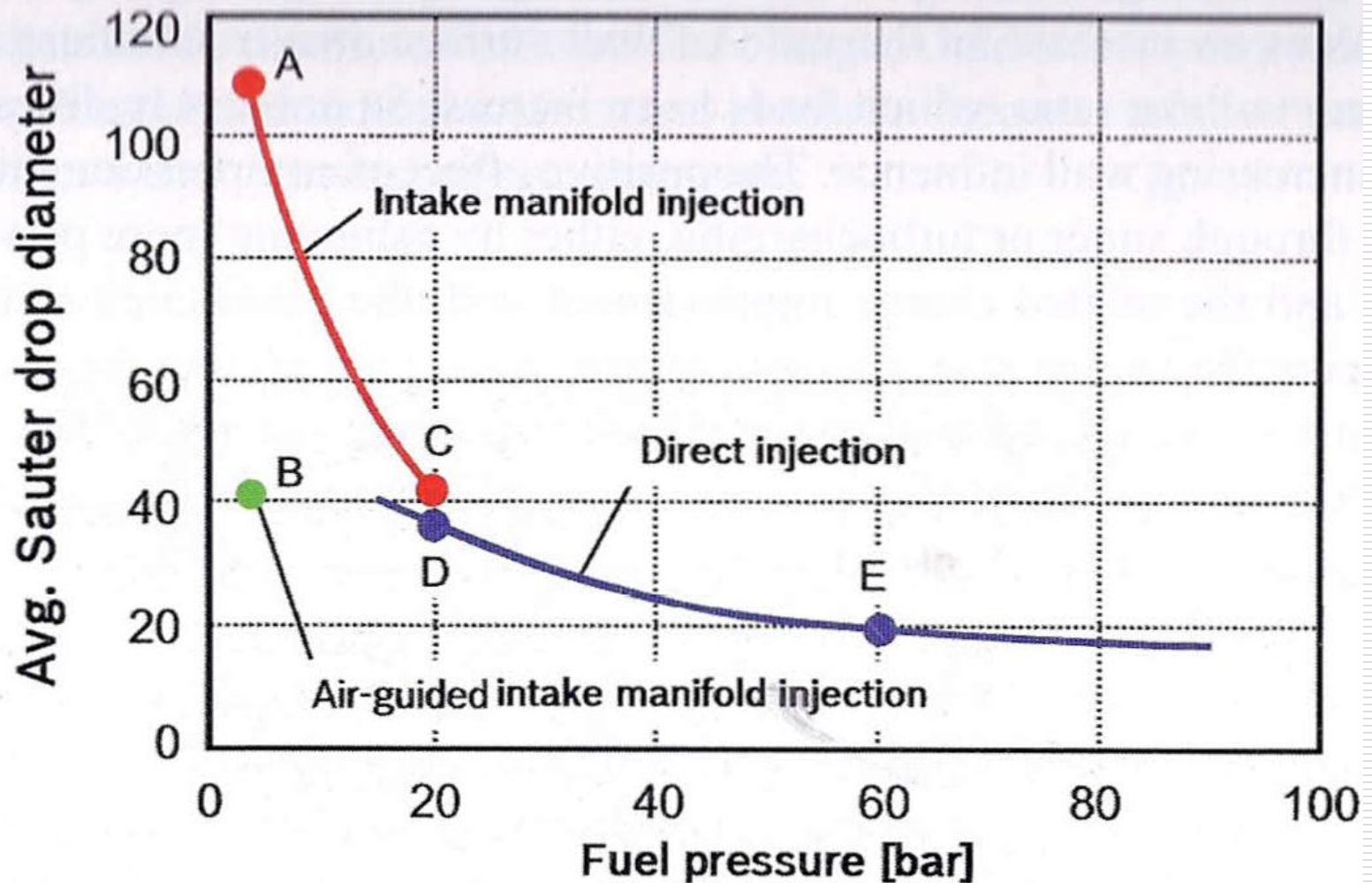
## У поређењу са PFI моторима:

- ❑ У комбинацији са надпуњењем смањење потрошње за око 10%.
- ❑ Смањење детонационог сагоревања због смањења температуре.
- ❑ Повећање степена компресије.
- ❑ Додатних 5% смањење потрошње.
- ❑ Више снаге.
- ❑ Смањење штетне емисије.





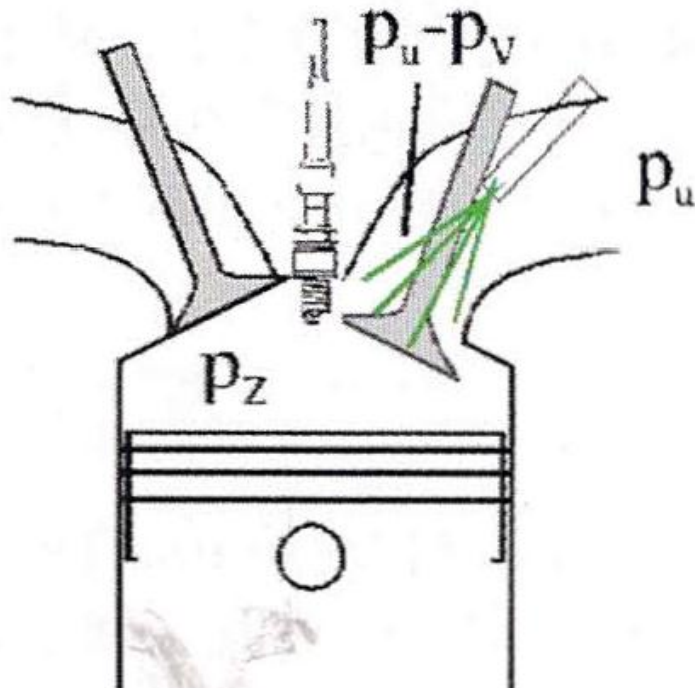
# Образовање хомогене смеше





# Образовање хомогене смеше

## Intake manifold injection

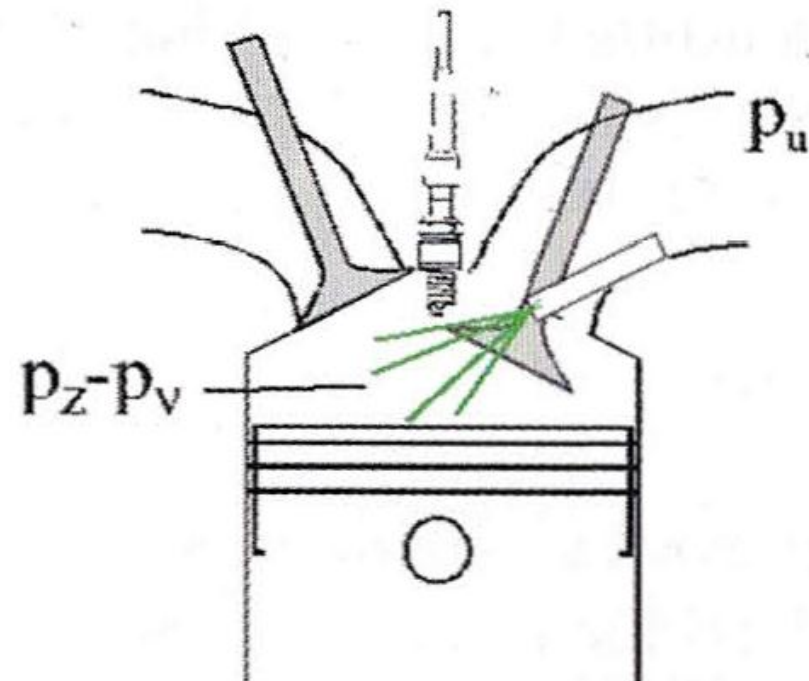


$$\Delta p_{\text{valve}} = p_u - p_z - p_v$$

$p_u$  — Ambient pressure

$p_z$  — Cylinder pressure

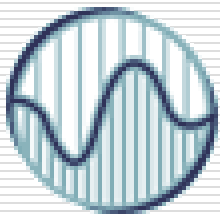
## Direct injection



$$\Delta p_{\text{valve}} = p_u - p_z + p_v$$

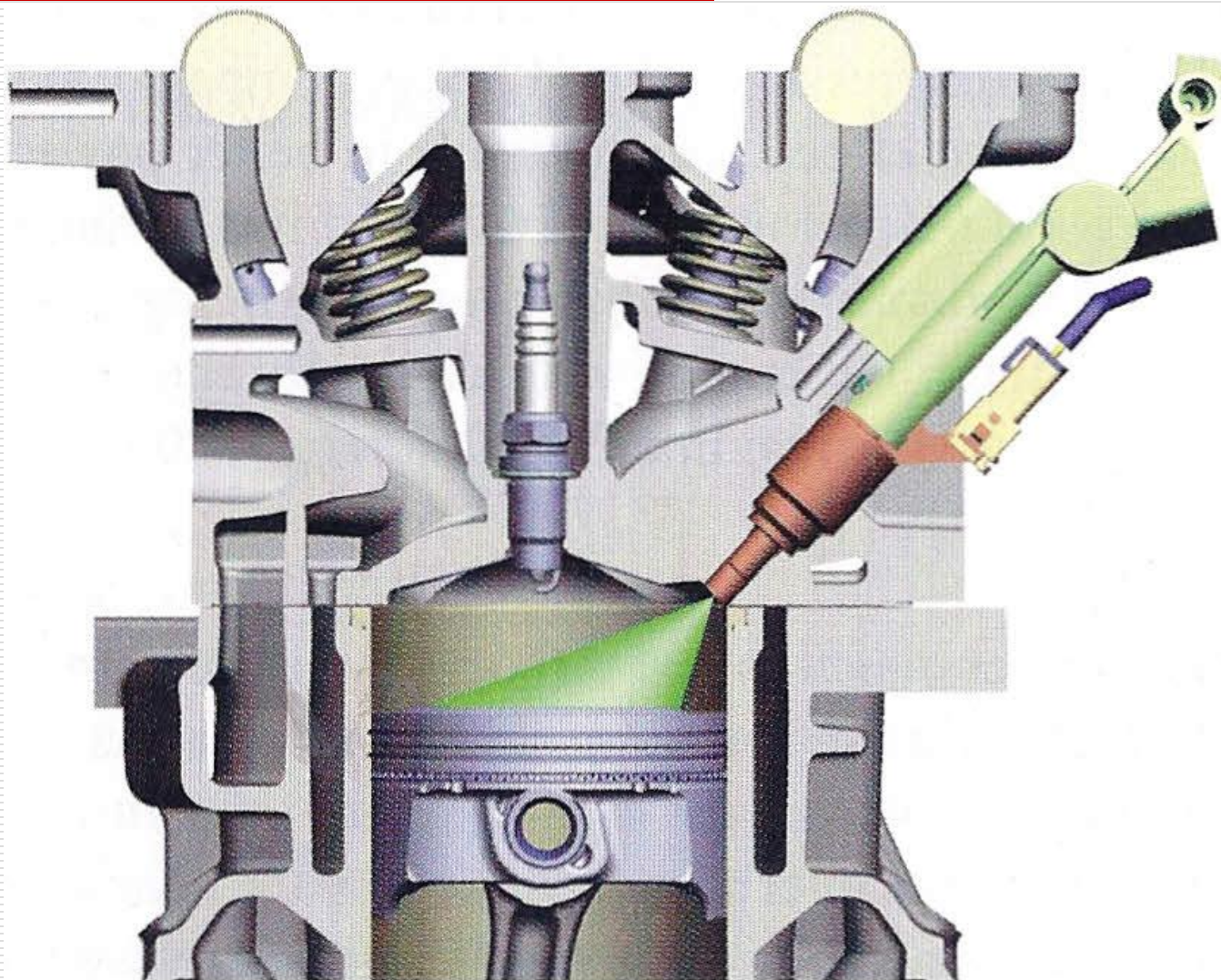
Pressure reduction  
due to evaporation

$p_v$  —



# Образовање хомогене смеше

---

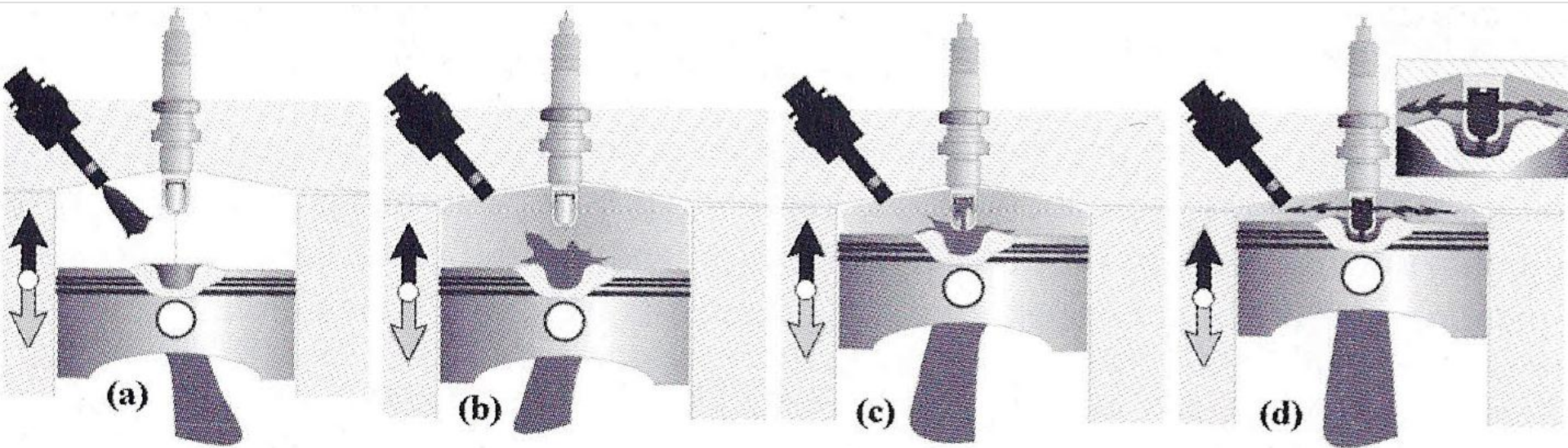






# BPI Process (Bowl Prechamber Ignition)

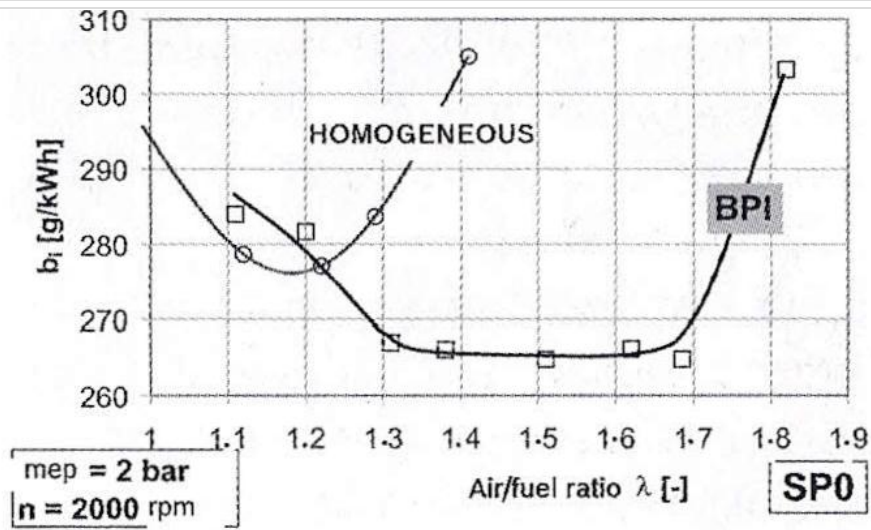
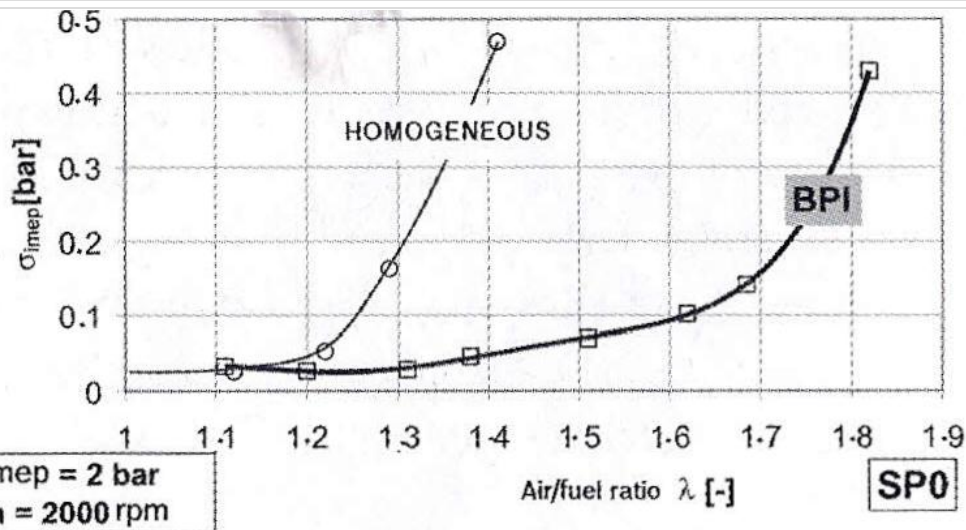
Рад са хомогеном сиромашном смесом.  
Мање од 5% укупне количине горива бива  
убризгано током такта сабијања.

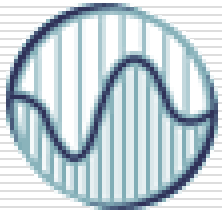




# BPI Process (Bowl Prechamber Ignition)

Поређење у односу на класични систем за образовање сиромашне хомогене смеше





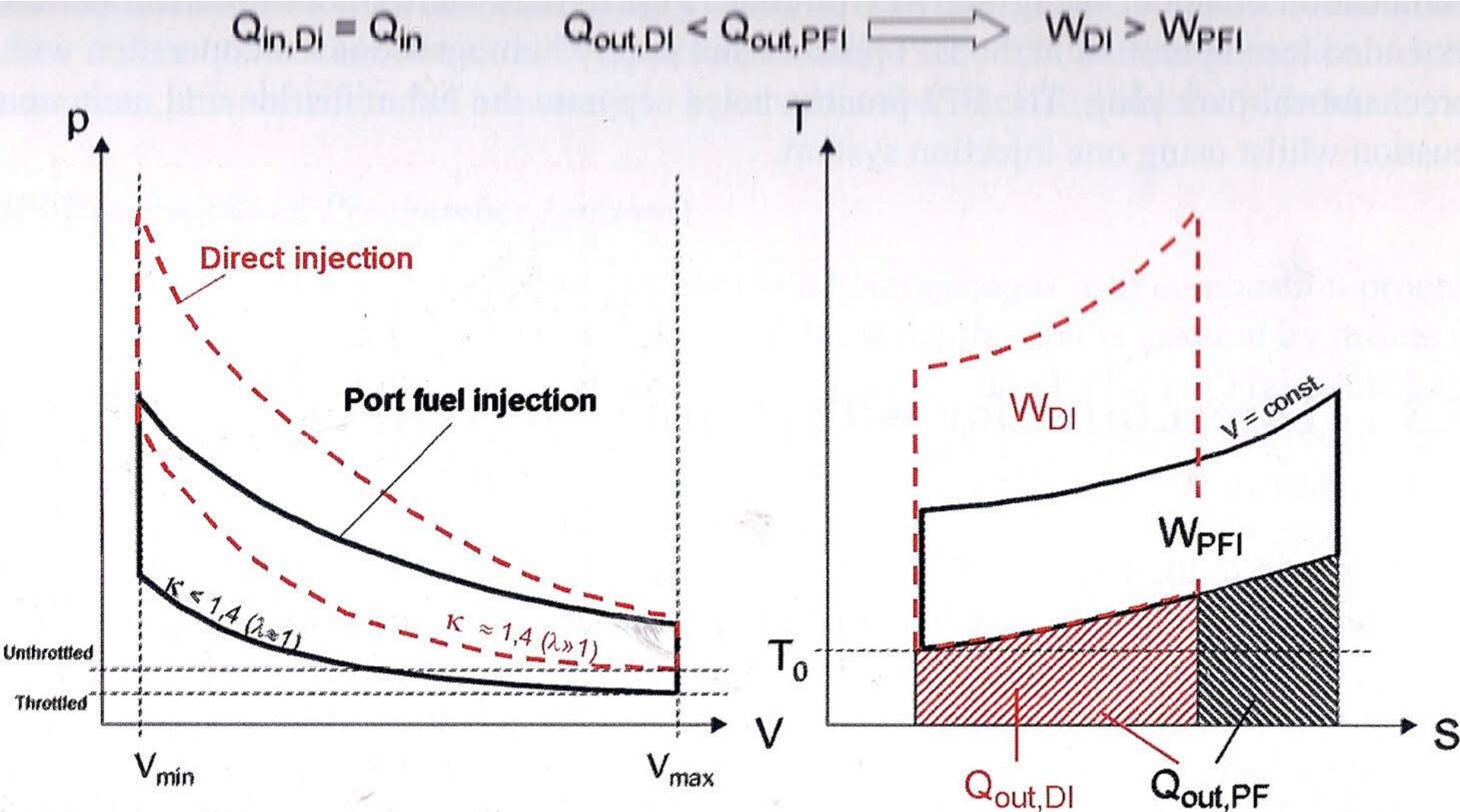
# Слојевито образовање смеше

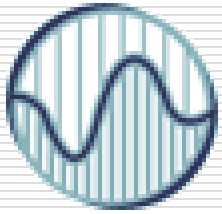
---

- ❑ Убризгавање искључиво у такту компресије.
- ❑ Рад са изузетно сиромашном смешом.
- ❑ Потребно обезбедити састав смеше са минималним захтевима за поуздано упаљење у близини свећице независно од режима рада мотора.
- ❑ Састав смеше у зони свећице мора бити око стехиометријске, у удаљеним деловима коморе веома сиромашна. Однос ваздуха и горива је 3-5.



# Слојевито образовање смеше





# Слојевито образовање смеше

---

## Посебни захтеви:

- ☐ Состав смеше у близини свећице не сме да зависи од броја обртаја мотора и оптерећења.
- ☐ Струјање ваздуха.
- ☐ Облик коморе за сагоревање.
- ☐ Степен компресије.
- ☐ Позиција брызгача и свећице.
- ☐ Параметари убризгавања (место убризгавања, трајање убризгавања, геометрија млаза).



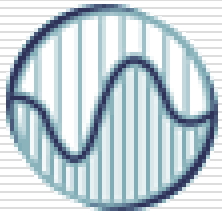


# Слојевито образовање смеше

---

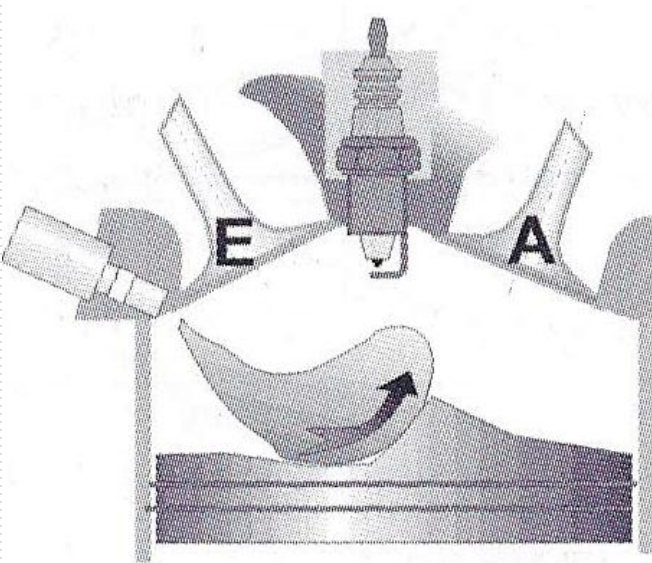
**Класификација порцеса образовање  
смеше моторе са директним  
убризгавањем бензина:**

- ☐ Wall-guided – Зидом вођени процес
- ☐ Air-guided – Ваздухом вођени процес
- ☐ Spray-guided – образовање смеше  
млазом

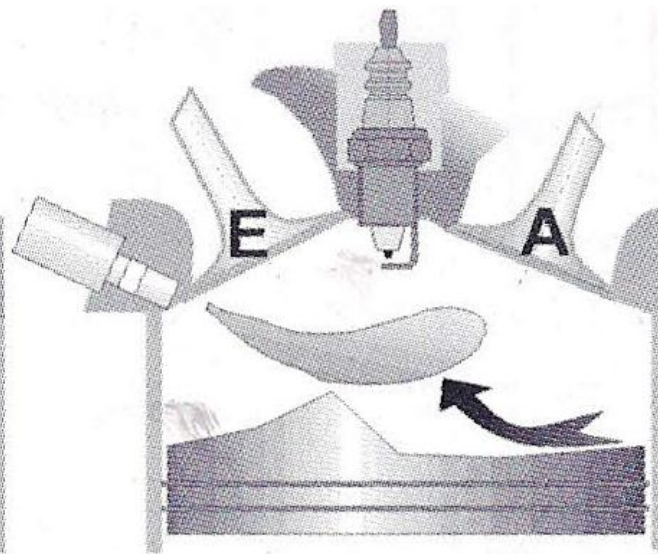


# Слојевито образовање смеше

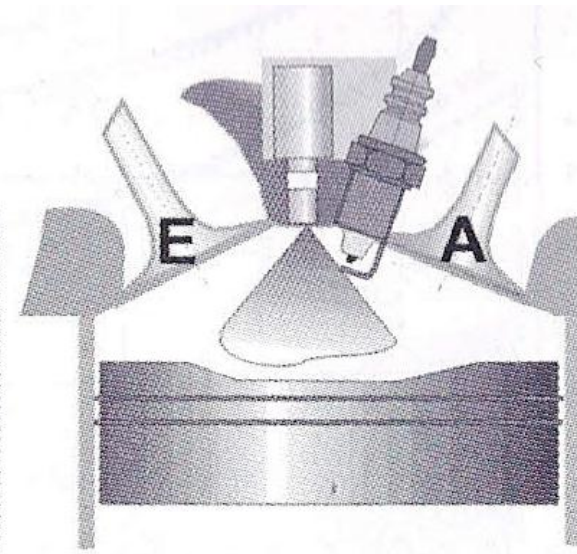
---



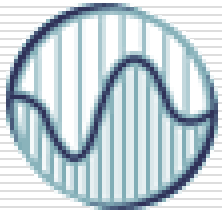
Wall-guided



Air-guided



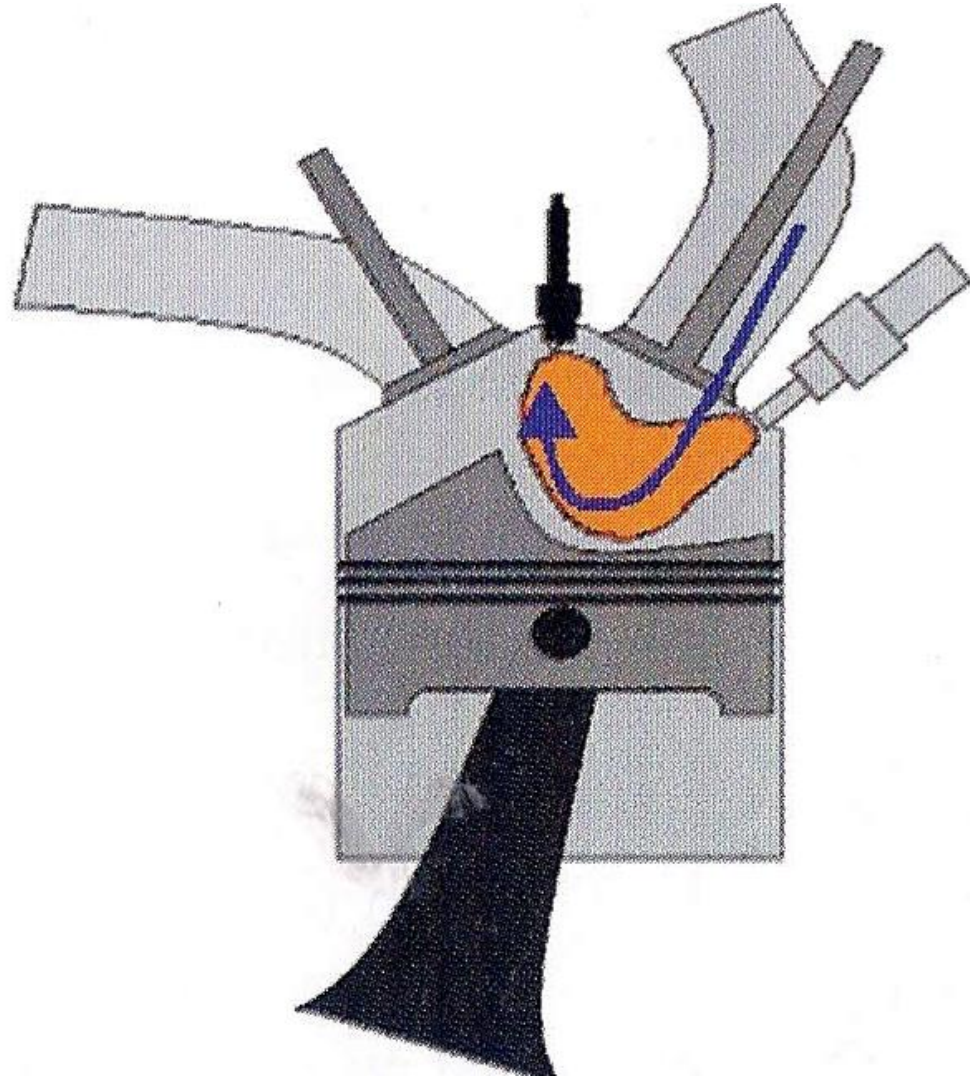
Spray-guided

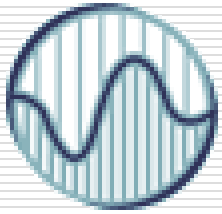


# Wall-guided combustion process

## Специфичности:

- Начин пуњења може бити или вртложењем или тумбањем ваздуха.
- Специфичан дизајн клипа
- Велика удаљеност брызгача од свећице захтева специфично и стабилно пуњење цилиндра, као и прецизно дефинисање времена убризгавања.
- Велика акумулација горива, води до повећаног HC, нарочито код хладног старта.

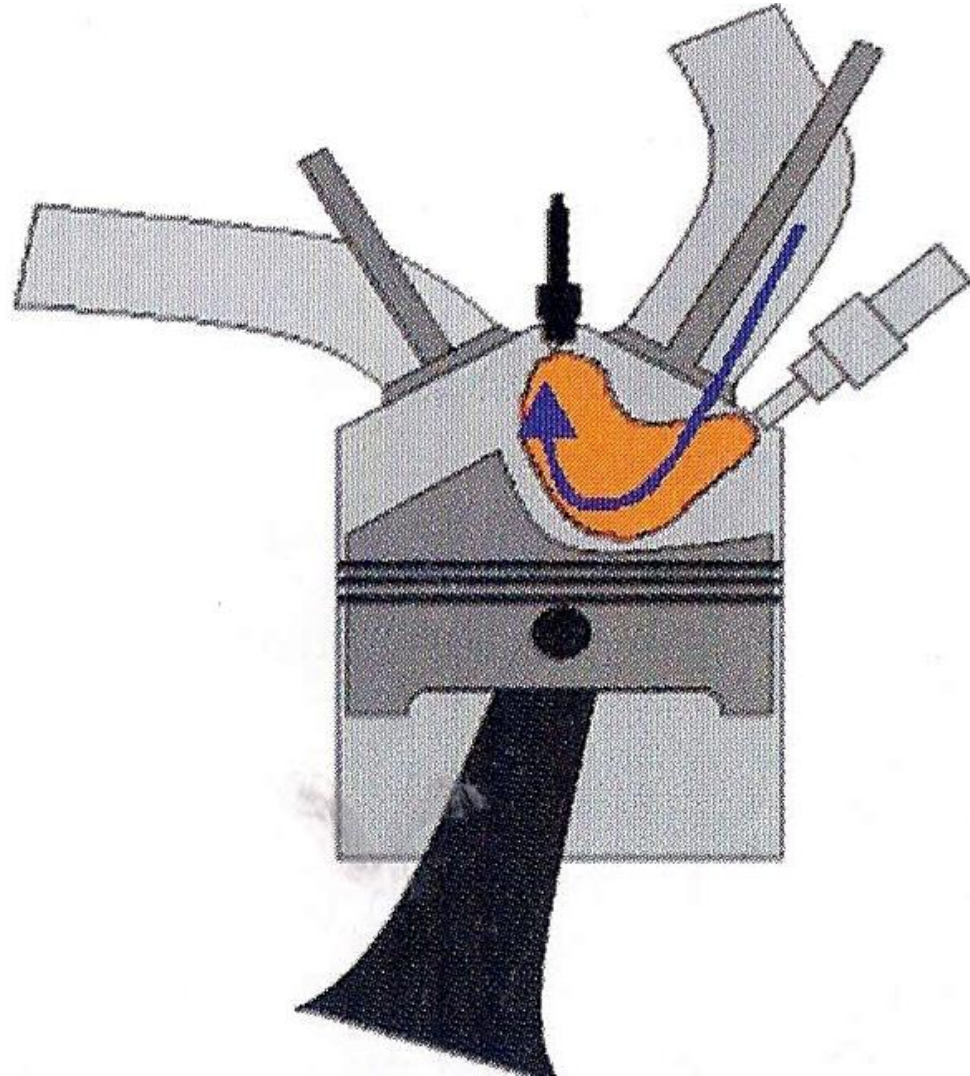




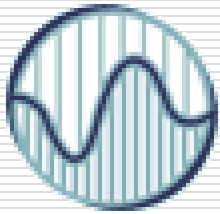
# Wall-guided combustion process

## Специфичности:

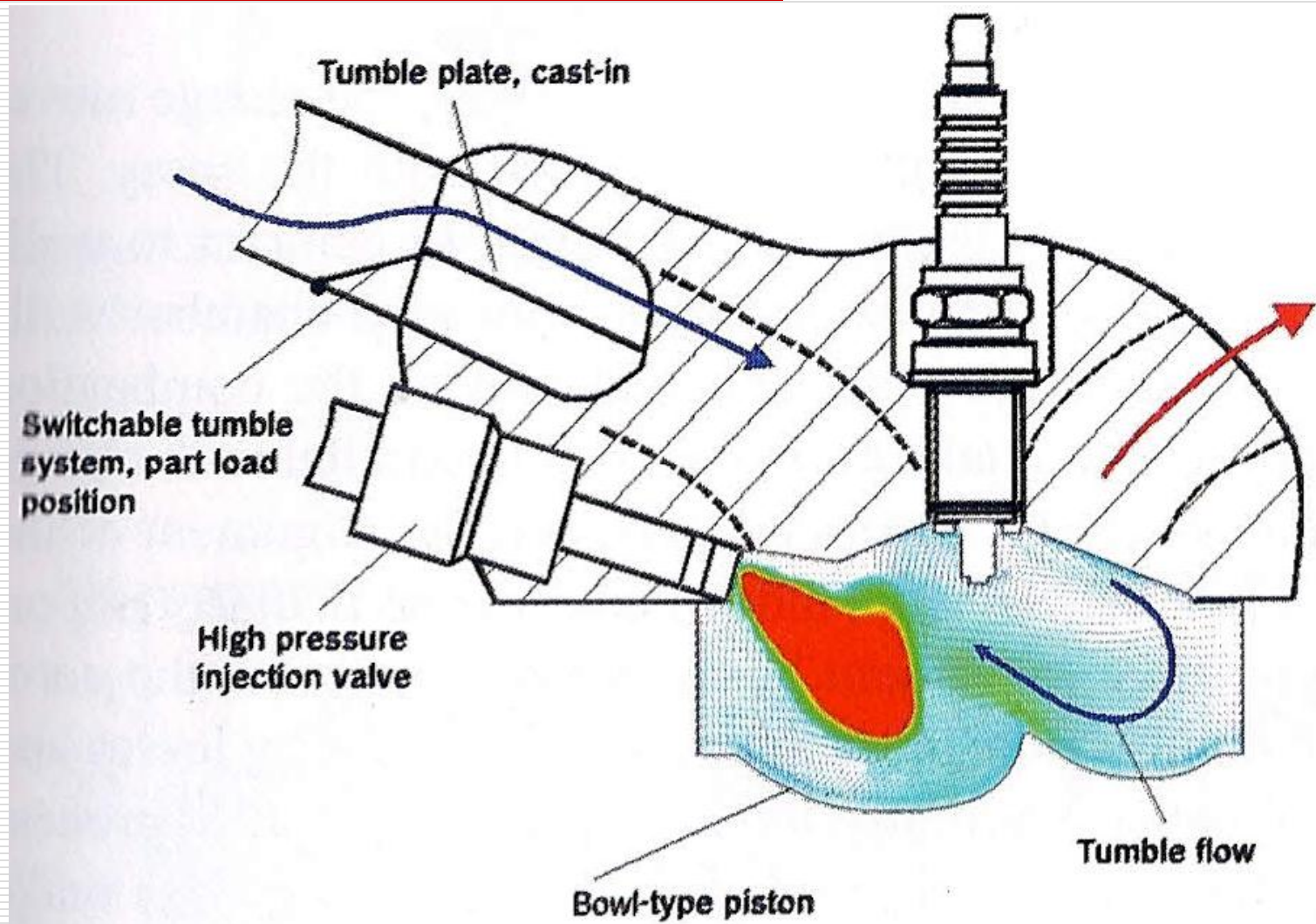
- ❑ Немогуће је искористити све предности слојевитог начина убризгавања услед повећаних топлотних губитака.
- ❑ Ограничен на рад на ниским оптерећењима и на ниским бројевима обртаја.
- ❑ Да би се обезбедио стабилан рад не ради увек са потпуно отвореним лептиром.

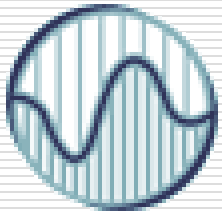




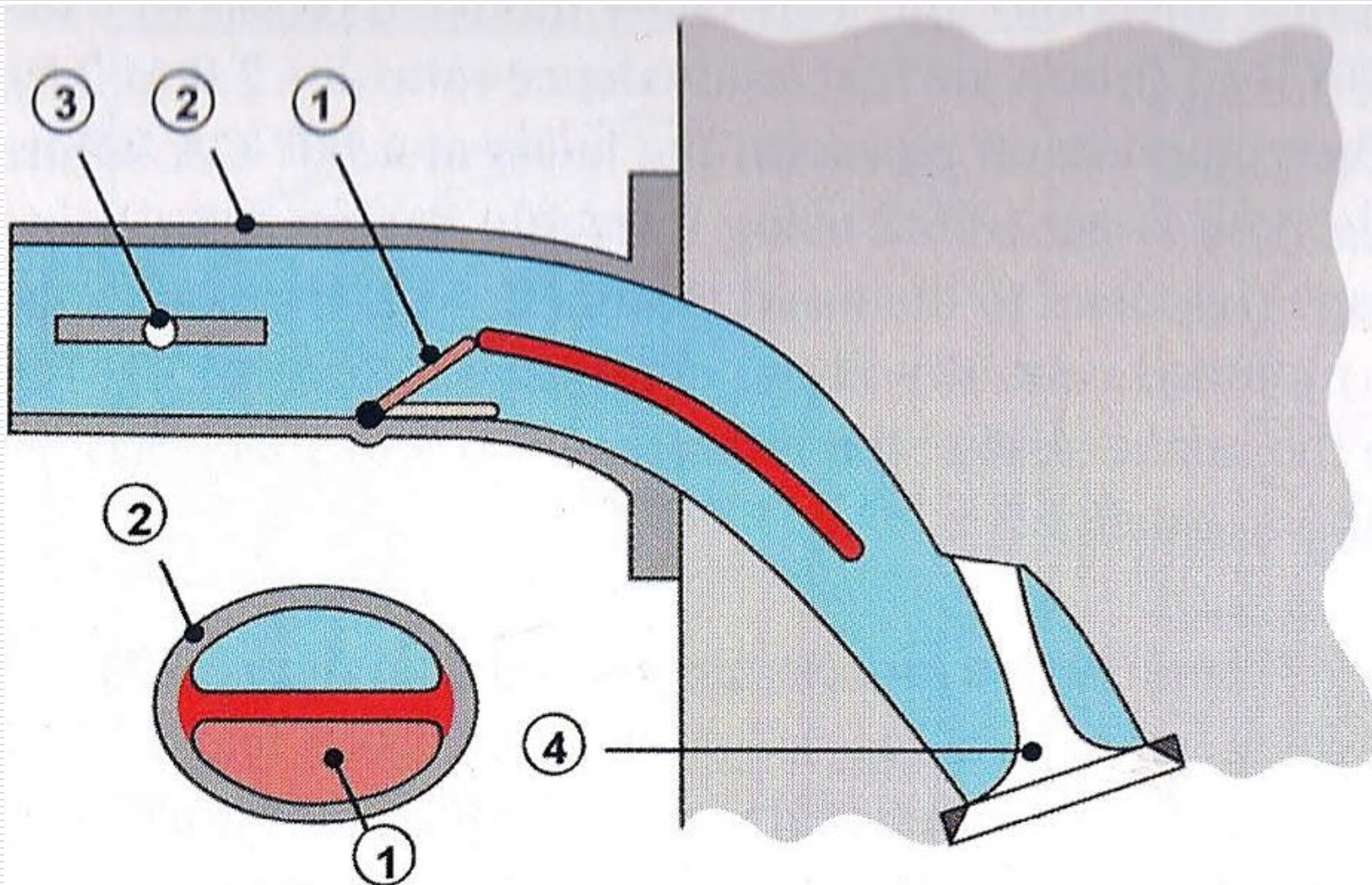


# Wall-guided combustion process

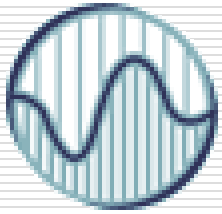




# Wall-guided combustion process







# Air-guided combustion process

---

## Карактеристике:

- ☐ Смеша се доводи до свећице искључиво струјањем ваздуха.
- ☐ Нема контакта горива и зидова коморе за сагоревање. Заправо требао би бити избегнут!
- ☐ Специфичан облик чела клипа.
- ☐ Убризгавање у такту компресије.
- ☐ Велика удаљеност брызгача од свећице.
- ☐ Може се применити и вртложење и начин пуњења тумбањем ваздуха.
- ☐ Ретко у примени и комбинује се са Wall-guided combustion process.

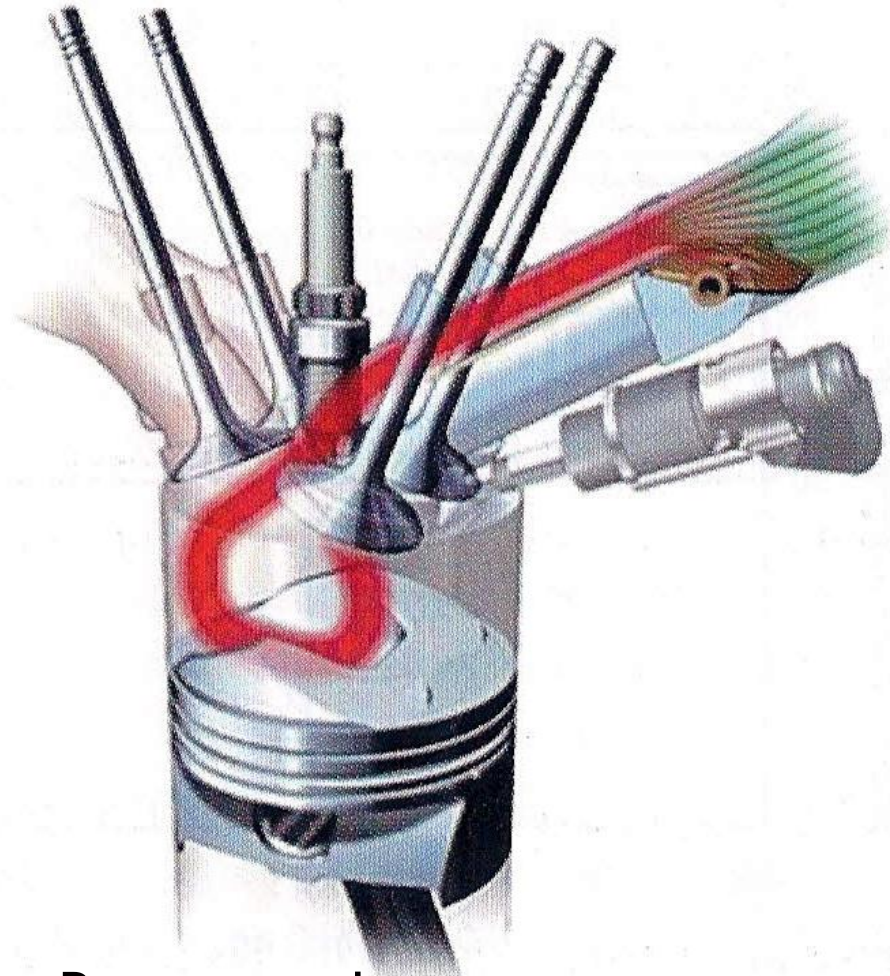


# Air-guided combustion process

---

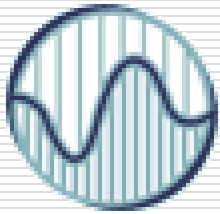


Рад са хомогеном смешом

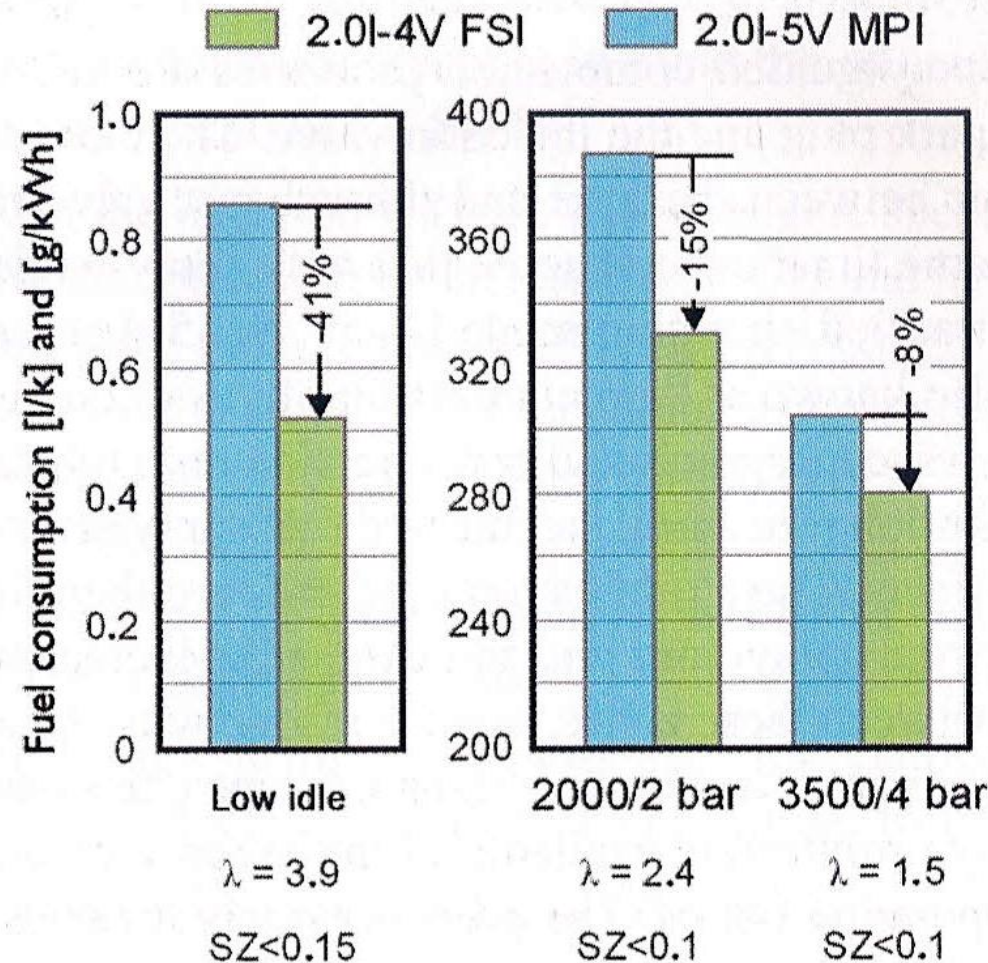
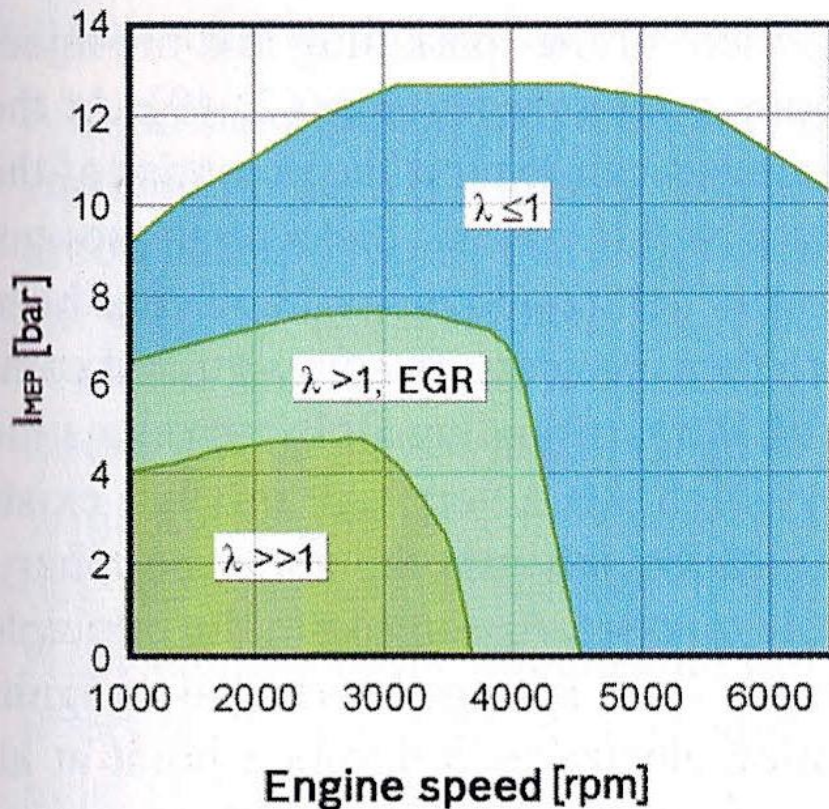


Рад са слојевитом смешом





# Air-guided combustion process



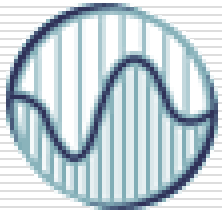


# Spray-guided combustion process

---

## Карактеристике:

- ☐ Мала удаљеност брызгача од свећице – проблем?
- ☐ Једино овај начин образовања смеше може остварити све предности слојевитог убризгавања.
- ☐ Познат под називом директно убризгавање друге генерације.
- ☐ Убризгано гориво се се меша са околним ваздухом применом аеродинамичкг ефекта.
- ☐ Веома богата смеша је у језгру млаза и састав се мења кретањем према периферији млаза где је веома сиромашна.
- ☐ Између ових зона је зона која омогућава поуздано упаљење.



# Spray-guided combustion process

---

## Карактеристике:

- ❑ Процес изразито зависи од карактеристика млаза.
- ❑ Могуће је формирање слоја карбона на брызгачу али и на свећици услед нижих температура сагоревања.
- ❑ Захтевају се веома строге толеранције отвора брызгача.
- ❑ Висока температурна оптерећења свећице. Течно гориво долази у контакт са врелом свећицом – термални шок!





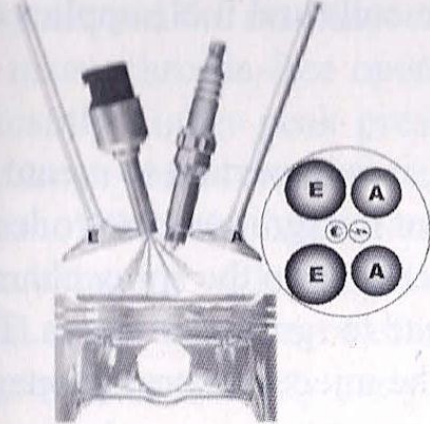
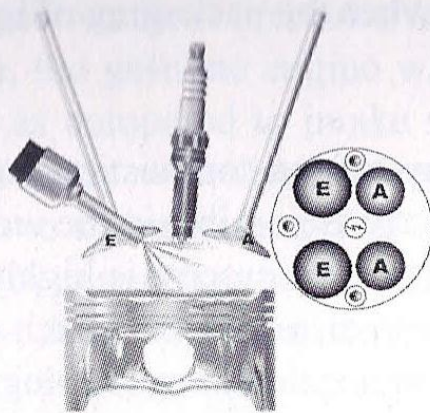
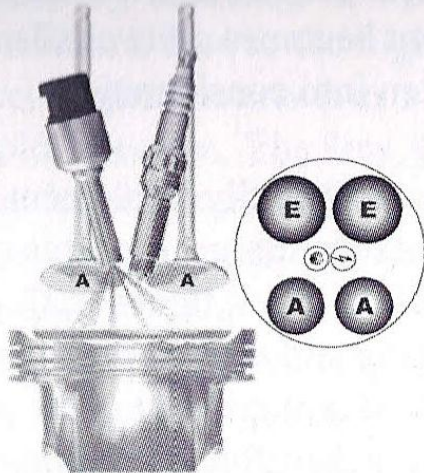
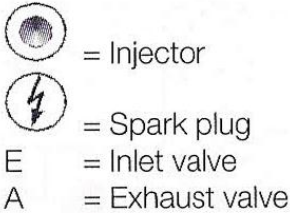
# Spray-guided combustion process

---

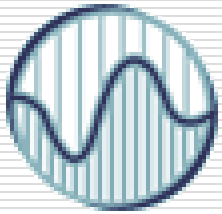
## Карактеристике:

- ❑ Неадекватна смеша са каснијим убризгавањем! Само неколико степени разлике до варнице! Мало времена за формирање смеше.
- ❑ Неадекватна смеша на нижим оптерећењима. Мали број обртаја даје неповољно струјање ваздуха, па опада релативна брзина између млаза и струјања ваздуха. Капљице су веће и гориво не испарава на адекватан начин.
- ❑ На вишим бројевима обртаја расте релативна разлика између млаза и струјања ваздуха па су капљице ситније и лакше, па је теже обезбедити облак одговарајуће смеше у зони свећице.

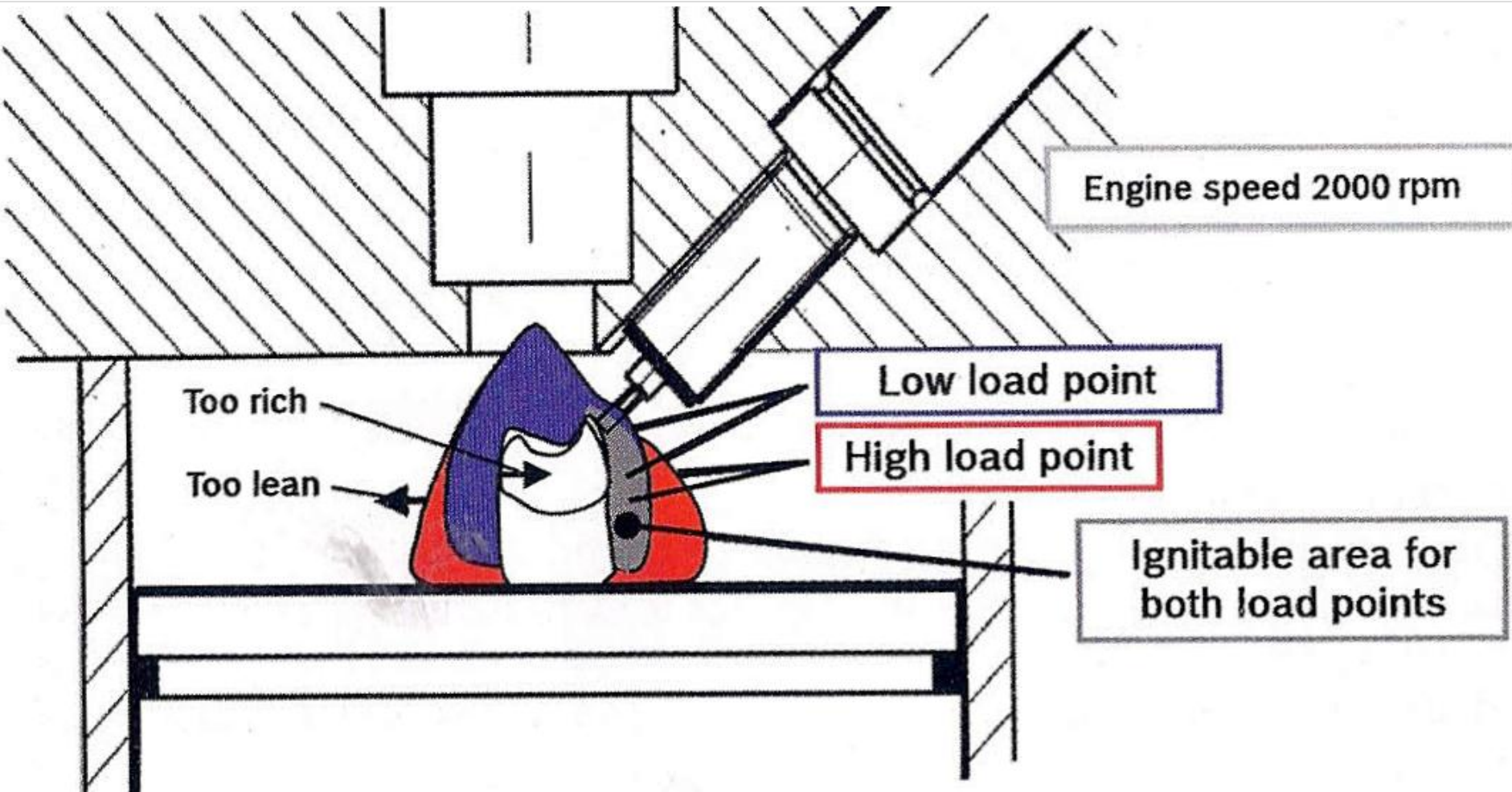


		
Transverse arrangement	Distant arrangement	Longitudinal arrangement
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ good injector cooling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ good spark plug cooling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ good compromise with respect to thermal load on spark plug and injector</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ simple arrangement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ simple construction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ no influence on the construction of the inlet port</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- longitudinal water cooling difficult</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- longitudinal water cooling difficult</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ longitudinal as well as transverse water cooling possible</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- restricted inlet or exhaust port</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- restricted inlet or exhaust port</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- arrangement difficult (fuel rail / ignition coils)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- high thermal load on spark plug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- high thermal load on injector (rapid formation of deposits)</li> </ul>	<div data-bbox="1425 1129 1715 1339">  <ul style="list-style-type: none"> <li>= Injector</li> <li>= Spark plug</li> <li>E = Inlet valve</li> <li>A = Exhaust valve</li> </ul> </div>

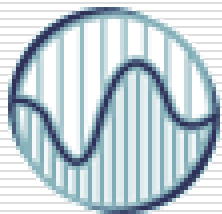
+ very good, - less good



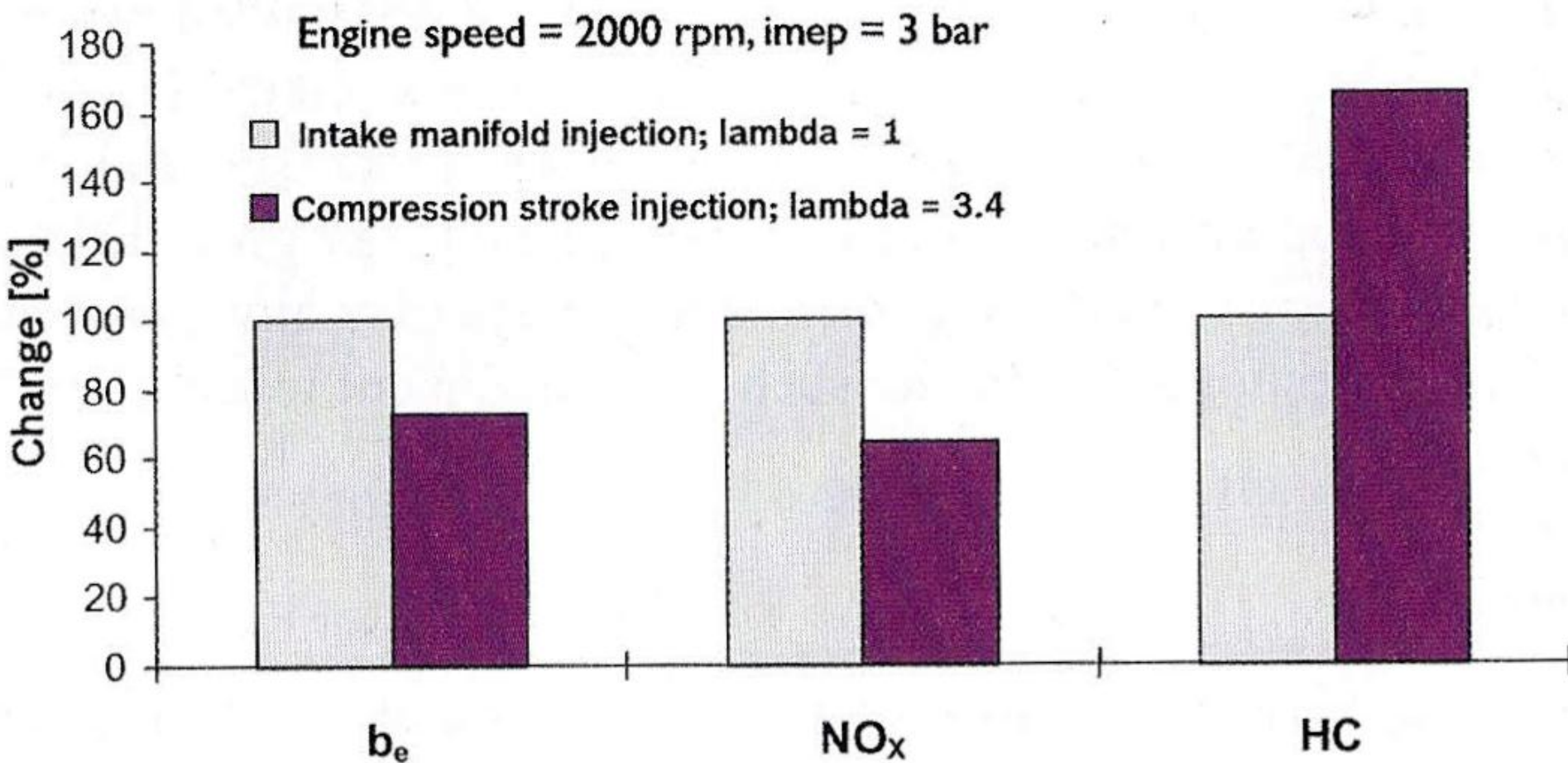
# Spray-guided combustion process

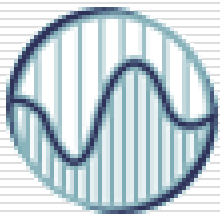




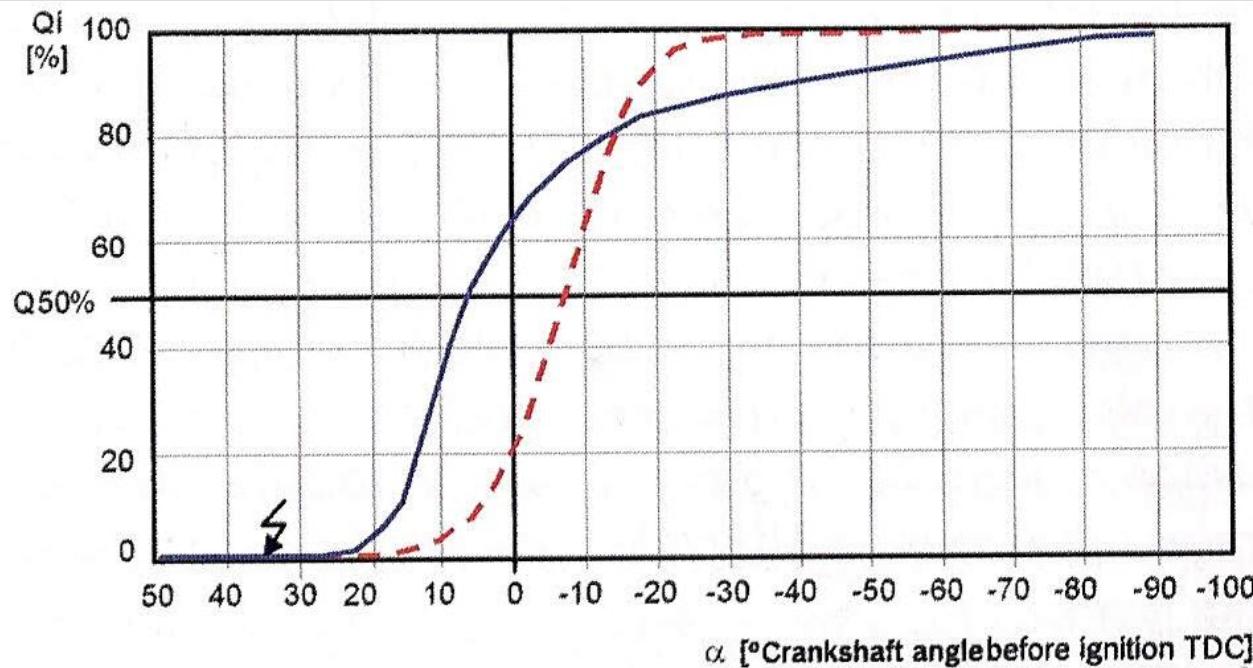
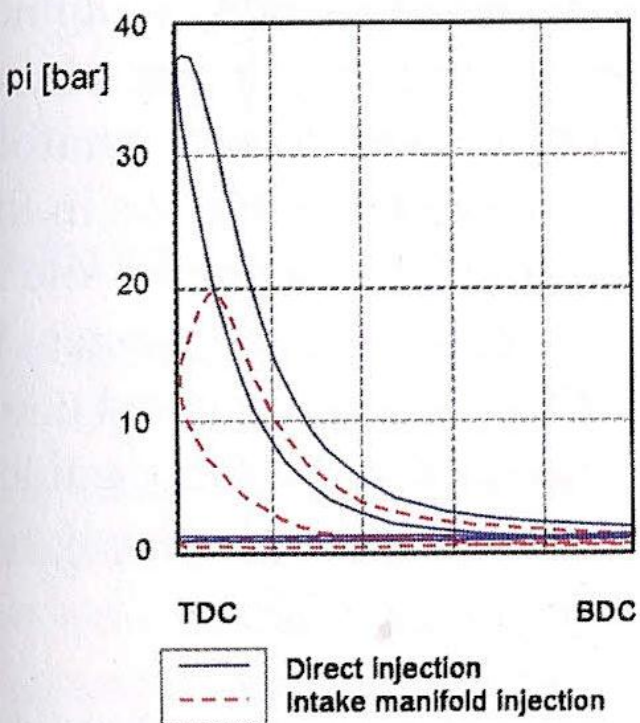


# Упоредни приказ карактеристика GDI и PFI мотора





# Упоредни приказ карактеристика GDI и PFI мотора







# Упоредни приказ карактеристика GDI и PFI мотора

