Politechnika Wrocławska

Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój

Politechnika Wrocławska

Unia Europejska Europejski Fundusz Społeczny

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Materiały pomocnicze do wykładu:

Spalanie w napędach lotniczych

Tomasz Hardy
Politechnika Wrocławska

Ciekłe paliwa opałowe i napędowe

Paliwa ciekłe dzieli się na:

- **naturalne** (ropa naftowa i jej pochodne, oleje łupkowe, smoła łupkowa),
- **sztuczne** (alkohole, paliwa z upłynniania węgla, oleje roślinne).

2

Skład frakcyjny ropy naftowej

Produkty destylacji ropy naftowej:

- lekka benzyna: 313–433 K (40–160°C),
- ciężka benzyna (ligroina): 433–473 K (160–200°C),
- nafta: 473–590 K (200–317°C),
- olej napędowy: 590–633 K (317–360°C),
- lekki destylat próżniowy: 633–813 K (360–540°C),
- ciężki destylat próżniowy: powyżej 813 K.

3

Skład elementarny ropy naftowej

Można wymienić pięć podstawowych pierwiastków w ropie naftowej

Pierwiastek	Udział, %wag.
Węgiel	83-87
Wodór	12-14
Siarka	0,01-8
Azot	0,01-1,2
Tlen	0,05-4

Inne pierwiastki w ropie, jak wanad, nikiel, żelazo, mangan, kobalt, fosfor, oraz mikroelementy występują w stężeniu rzędu wartości 10^{-3}–10^{-5} %.

4

Produkty naftowe

- gaz płynny,
- paliwa silnikowe (benzyny, oleje napędowe, nafty),
- oleje opałowe,
- stałe węglowodory naftowe (parafiny, cerezyny, wazeliny),
- asfalty drogowe i przemysłowe,
- surowce węglowodorowe do syntez organicznych.

5

Procesy przeróbki ropy naftowej

Nazwa		Wartość opałowa, kJ/kg	Zastosowanie
Benzyny	**lotnicza**	42 900-46 500	do tłokowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym w lotnictwie
	samochodowa	42 900-46 500	do tłokowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym w motoryzacji oraz w innych maszynach i urządzeniach
	traktorowa	43 500-45 250	do tłokowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym w traktorach i innych maszynach rolniczych
Nafty	**lotnicza**	42 400-45 700	do turbinowych silników spalinowych w lotnictwie
Oleje	napędowe	41 800-42 750	do tłokowych silników z zapłonem samoczynnym w motoryzacji oraz w energetycznych turbinach gazowych
	opałowe	39 400-39 800	do palników olejowych w urządzeniach grzewczych, energetycznych i przemysłowych

6

Benzyna

Benzyny to podstawowe paliwo motorowe do silników ZI składające się z lotnych frakcji ropy naftowej o temperaturze wrzenia w zakresie 30-200 °C.

Najważniejsze składniki benzyn to: węglowodory alifatyczne (łańcuchowe), cykloalkany i węglowodory aromatyczne (np. benzen).

Ważniejsze właściwości: zdolność do tworzenia mieszanek palnych, skłonność do tworzenia osadów żywicznych, charakterystyka stukowa (liczba oktanowa LO).

Przykłady benzyn samochodowych: LO 95, LO 98

7

Komponenty benzyny

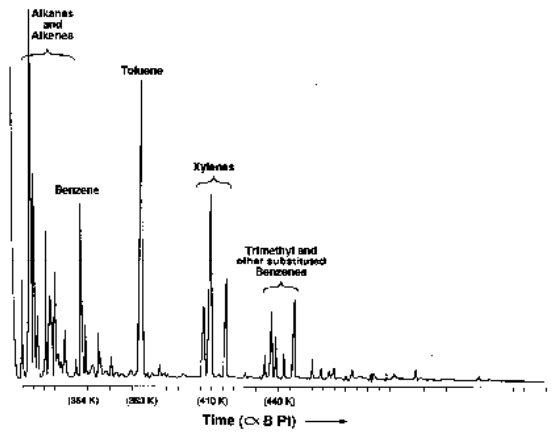


Figure 1.1 A gas chromatographic analysis of aromatic hydrocarbons in a typical unleaded gasoline. The time of elution from the column is proportional to the boiling point of the component (as marked in representative cases) and the peak height is proportional to the amount (analysis courtesy of B. Frere).

Benzyna zawiera lekkie frakcje ropy naftowej (węglowodory).

8

Komponenty benzyny

Benzynę otrzymuje się ja przez rafinację ropy naftowej lub syntetycznie z węgla, gazu ziemnego lub łupków bitumicznych.

W celu poprawy LO stosuje się do benzyny dodatki antystukowe:

- czteroetylek ołowiu $(C_2H_5)_4Pb$
- czterometylek ołowiu $(CH_3)_4Pb$
- związki organiczne i metyloorganiczne o wysokiej LO

9

Benzyna motorowa 95

Benzyna bezołowiowa 95
Wg ZN-ORLEN-38:2004

Liczba oktanowa min.		95,0
Gęstość w temp. 15 °C		720 - 775 kg/m^3
Zawartość siarki ≤		50 mg/kg
Zawartość benzenu ≤		1,0 %(*V/V*)
Zawartość węglowod. aromat.	≤	35,0 %(*V/V*)
Łączna zawartość tlenu	≤	2,7 %(m/m)

10

Benzyna syntetyczna

More than 92 percent of Germany's aviation gasoline and half its total petroleum during World War II had come from synthetic fuel plants. At its peak in early 1944, the German synfuels effort produced more than 124,000 barrels per day from 25 plants.

In the USA the Synthetic Liquid Fuels Act was approved on April 5, 1944. The Act authorized $30 million for a five-year effort for: "the construction and operation of demonstration plants to produce synthetic liquid fuels from coal, oil shales, agricultural and forestry products, and other substances, in order to aid the prosecution of the war, to conserve and increase the oil resources of the Nation, and for other purposes."

11

Metody wytwarzania syntetycznej benzyny

HISTORY OF SYNTHETIC LIQUID FUELS

Friedrich Bergius (1913) – hydrogenation of pulverised coal under high-pressure

Franz Fischer and Hans Tropsch (1926) – liquid hydrocarbon fuels from synthesis gas

first coal hydrogenation plant – 1927 (Leuna – Germany)

first Fischer-Tropsch plant – 1936 (Mörs-Meerbeck – Germany)

1. Dissolving coal directly into a liquid as in the Bergius process
2. The Fischer-Tropsch method first transformed coal into a gas, then chemically rearranged the gaseous molecules into liquid fuels and chemicals.

12

Oleje napędowe

Oleje napędowe (Diesla) zawiera cięższe frakcje węglowodorów niż nafty (destylacja wieżowo-rurowa i destrukcyjna pozostałości ropnych).

Składa się głównie z węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych o własnościach:

- ciężar molowy oleju napędowego wynosi: 178,6
- **średni skład: $C_{12,9}H_{23,9}$**

Ważniejsze właściwości: lepkość (rozpylanie), odporność na samozapłon (liczba cetanowa), temperatura krzepnięcia, zawartość siarki.

Zastosowania: silniki tłokowe z zapłonem samoczynnym, turbiny gazowe.

13

Podział lotniczych paliw silnikowych

Rodzaj paliwa		Zastosowanie	Statek powietrzny
Benzyna lotnicza		Tłokowe silniki spalinowe ZI	Samoloty, śmigłowce
TURBINOWE	Ciężka benzyna	Silniki odrzutowe	Samoloty
	Paliwa szerokofrakcyjne	Silniki odrzutowe, śmigłowcowe i śmigłowe	Samoloty, śmigłowce
	Nafta lotnicza	Siln. odrzutowe, śmigłowcowe, śmigłowe i rakietowe	Samoloty, śmigłowce
	Oleje napędowe	Silniki rakietowe i odrzutowe	Rakiety, samoloty
Oleje napędowe		Lotnicze silniki tłokowe	Samoloty

14

Charakterystyka energetyczna lotniczych paliw silnikowych

Rodzaj paliwa	Wartość opałowa		Stosunek C/H	Udział wodoru
	MJ/kg	MJ/m^3		
Benzyna lotnicza	43,12–44,0	32,0–33,2	5,26–6,54	13,25–15,2
Ciężka benzyna	>43	30,6–32,2	5,9–6,25	13,8–14,5
Paliwo szerokofrakcyjne	>42,9	32,5–33,6	5,94–6,3	13,7–14,4
Nafta lotnicza	42,5–43,12	34,0–35,9	5,99–6,35	13,6–14,3
Olej napędowy	42,5–43,1	36–36,5	6,1–6,52	13,3–14,1

15

Paliwa do turbin gazowych

Zastosowanie militarne: nafta
Zastosowanie cywilne: benzyna

Typ paliwa	Benzyny	Nafty
Względna gęstość w 311 K	0,793	0,82-0,88
Lepkość w 311 K, cSt	1,4	2-4
Temperatura zapłonu (Flash point), K	311-344	339-367
Temperatura krzepnięcia (Pour point), K	228	253-273
Wartość opałowa, MJ/kg	42,8	42-43
Udział siarki, % mas.	0,01-0,1	0,1-0,8

Silniki turbinowe mogą być zasilane: ciężką benzyną, paliwami szeroko-frakcyjnymi, naftami lotniczymi, olejem napędowym, wodorem, paliwami syntetycznymi.

16

Paliwa lotnicze

Najczęściej stosowanymi paliwami do turbinowych silników lotniczych dla lotnictwa komercyjnego są **JET A** i **JET A-1**.

Jedynym innym paliwem lotniczym powszechnie stosowanym w lotnictwie cywilnym napędzanym silnikiem turbinowym jest **JET B**, które jest wykorzystywane do zwiększonej wydajności w niskich temperaturach (jest stosowane w Kanadzie i na Alasce).

Paliwa JET A i JET A-1 różnią się przede wszystkim temperaturą krystalizacji (zamarzania): dla JET A wynosi -40 °C, dla JET A-1 wynosi -47 °C, a dla JET B -60 °C

Inną różnicą jest obowiązkowe dodanie dodatku antystatycznego do paliwa JET A-1. Oczywiście zbiorniki i cysterny mają inne piktogramy.

Podstawową zaletą stosowania paliwa JET A-1 jest możliwość jego używania przez cały rok, bez konieczności śledzenia warunków pogodowych. Paliwo JET A już takiej kontroli wymaga.

17

Paliwa lotnicze

Wojskowe nafty lotnicze oznaczane jako **JP** ("Jet Propellant").

Niektóre z tych paliw są niemal identyczne z paliwami cywilnymi. Mogą się jednak różnić dodatkami. Na przykład JP-8 to niemal to samo, co JET A-1. JP-4 to niemal to samo, co JET B.
Z kolei inne są wysoko wyspecjalizowanymi paliwami będącymi mieszaninami różnych związków chemicznych połączonych ze specyficznymi dodatkami.

W lotnictwie wojskowym, według kodów NATO stosuje się paliwa
F-35 (czyli JET A-1),
F-34 (JP-8),
F-40 (JP-4),
F 44 (JP-5).
Dawniej stosowano jeszcze JP-1, JP-2 i JP-3.

18

Paliwa lotnicze

P ALIWO JET A- 1 (www.orlen.pl)

PALIWO JET A-1

Data sporządzenia: 01.10.1998 / Data aktualizacji: 01.06.2015 Wersja: 2

Temperatura topnienia/krzepnięcia	: < -20 °C; [< -47°C]
Temperatura/zakres wrzenia (1013 hPa)	: 90 - 320 °C
Temperatura zapłonu	: 29-70°C; [min 38 °C]
Szybkość parowania	: Nie dotyczy- brak danych w CSR
Palność (ciało stałe, gaz)	: Nie dotyczy mieszanina jest cieczą
Dolna- górna granica wybuchowości	: Nie dotyczy- brak danych w CSR
Prężność par (37,8 °C)	: 1 - 21 kPa
Gęstość par	: Nie dotyczy- brak danych w CSR
Gęstość (15 °C)	: 0,77 – 0,85g/cm^3 ; [0,775-0,84 g/cm^3]
Gęstość nasypowa	: Nie dotyczy.
Rozpuszczalność w wodzie	: Praktycznie nie rozpuszcza się
Współczynnik podziału n-oktanol/woda	: Nie dotyczy- brak danych w CSR
Temperatura samozapłonu	: 220-250 °C
Temperatura rozkładu	: Nie dotyczy
Lepkość (-20 °C)	: 2,8 – 4,3 cSt;
(40 °C)	: 1 – 2,4 cSt
Właściwości wybuchowe	: Brak, mieszanina nie jest wybuchowa
Właściwości utleniające	: Brak, mieszanina nie jest utleniająca

19

Nafty lotnicze

Nafty to paliwo do silników lotniczych odrzutowych i turbośmigłowych, otrzymywane przez destylację wybranych gatunków rop.

- ciężar molowy nafty wynosi: 167,5 (12*12+23,5)
- **średni skład: $C_{12}H_{23,5}$** (mieszanina węglowodorów)

Ważniejsze właściwości: skład frakcyjny, lepkość paliwa, udział wody i zanieczyszczeń, temperatura krzepnięcia.

Przykłady naft lotniczych: JP4, JP5, Jet Al, AVTUR

20

Paliwa do lotniczych turbin gazowych

Wymagania ogólne:

1. Niski koszt i łatwość dostępu.
2. Małe ryzyko pożaru.
3. Duża wartość opałowa.
4. Wysoka termiczna stabilność.
5. Niskie ciśnienie parowania.
6. Duże ciepło właściwe.

Wymagania układu zasilania:

1. Łatwość pompowania.
2. Brak blokowania filtrów (woskiem i lodem).
3. Brak blokowania przewodów parami.
4. Wysoka smarność paliwa (mały zużycie pomp).

21

Paliwa do lotniczych turbin gazowych

Wymagania związane z pracą komór spalania

1. Brak blokowania wypływu w dyszach rozpylania paliwa.
2. Dobre rozpylanie (atomizacja).
3. Szybkie parowanie (mała lepkość i duża lotność).
4. Małe wytwarzanie sadzy.

22

Ważniejsze właściwości fizyczne paliw do turbin gazowych

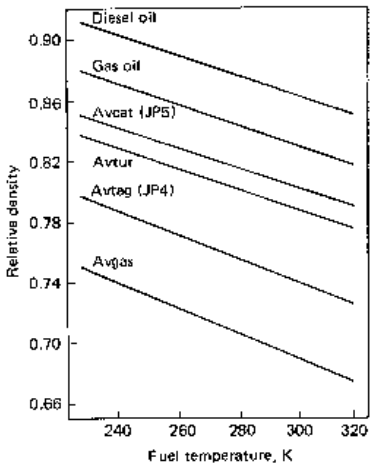


FIG. 9.4 Relative densities of typical gas turbine fuels

Względna gęstość d_r:

$$d_r = \rho_{pal,T1} / \rho_{H2O,T2}$$

T_1 – temperatura paliwa,

T_2 – temperatura wody (277 K)

23

Ważniejsze właściwości fizyczne paliw do turbin gazowych

Ciśnienie par

jest to ciśnienie par nad powierzchnią cieczy w danej temperaturze.

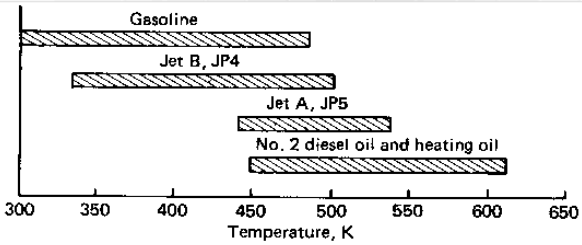


FIG. 9.7 Boiling ranges of various petroleum products [5].

24

Ważniejsze właściwości fizyczne paliw do turbin gazowych

Lepkość paliwa (kinematyczna)

określa opory przetłaczania i pompowania, ma wpływ na jakość rozpylania.

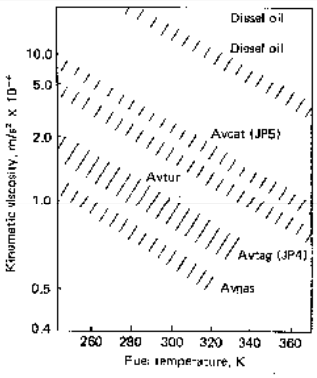
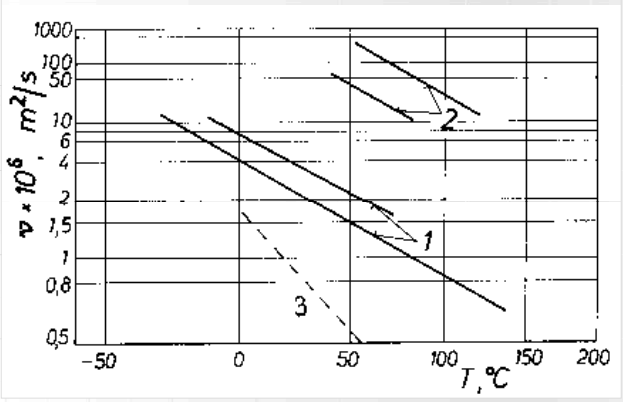


FIG. 9.10 Viscosity-temperature characteristics of typical fuels [7, 33].

25

Wpływ temperatury na lepkość oleju



1– olej napędowy, 2 – olej opałowy, 3 – woda

Jednostki lepkości kinematycznej

Podstawowa:

m^2/s

Pochodna:

$cSt = mm^2/s$

$1\ cSt = 10^{-6}\ m^2/s$

26

Ważniejsze właściwości fizyczne paliw do turbin gazowych

Wartość opałowa (w MJ/kg)

określa ciepło wyzwalane podczas spalania paliwa.

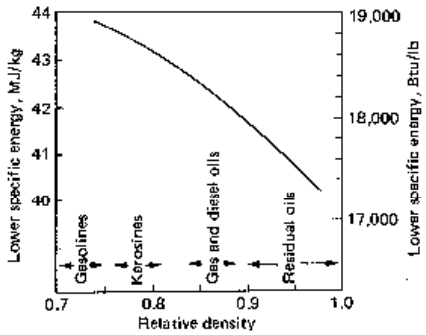


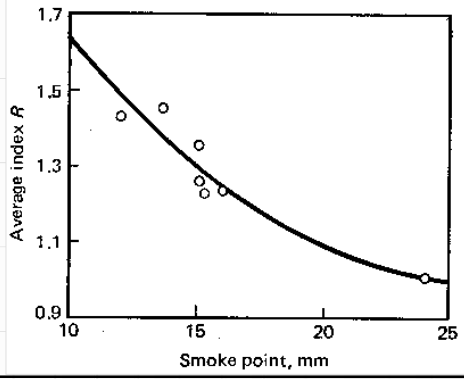
FIG. 9.15 Variation of specific energy with relative density for liquid petroleum fuels [7].

27

Ważniejsze właściwości fizyczne paliw do turbin gazowych

Punkt „sadzowania”

$$R = \frac{radiacja\ płomienia\ badanego\ paliwa}{radiacja\ płomienia\ paliwa\ wzorcowego}$$



28

Alkohole

Alkohole: metylowy i etylowy mogą być silnikowymi paliwami zastępczymi w stosunku do węglowodorów (benzyn).

Wytwarzanie alkoholi:

Metanol: można produkować na skalę przemysłową z takich surowców jak: gaz ziemny, węgiel, drewno i odpady.

Etanol: jest wytwarzany z biomasy przez fermentację i destylację.

29

Alkohole - wybrane właściwości

Właściwości	Metanol	Etanol
Chemiczna formuła	CH_3OH	C_2H_5OH
Wartość opałowa, kJ/kg	19 000	27 000
Zapotrzebowanie powietrza do spalenia, kg/kg	6,45	9,01
Lepkość w temp. 293 K, cSt	0,75	1,51
Liczba oktanowa	96	94

30

Oleje roślinne

Oleje roślinne i produkty ich przeróbki mogą być silnikowymi paliwami zastępczymi w stosunku do oleju napędowego (diesla).

Rodzaje olejów roślinnych do produkcji paliw:

- Rzepakowy
- Słonecznikowy
- Palmowy
- Sojowy

Estry kwasów tłuszczowych

31

Estryfikacja olejów roślinnych

Estryfikacja jest procesem oddziaływania na olej roślinny alkoholu metylowego/etylowego w obecności katalizatora.

W wyniku otrzymuje się estry metylowe kwasów tłuszczowych (EMKT, lub FAME z ang. *Fatty Acid Methyl Ester*) o właściwościach zbliżonych do właściwości olejów napędowych.

Wymagania właściwości EMKT, jako biopaliwa silnikowego, określa norma PN-EN 14214:2004.

Estry kwasów tłuszczowych

32

Porównanie oleju napędowego ON, oleju rzepakowego OR i estru metylowego EMKT

Właściwość	Rodzaj paliwa		
	ON	OR	EMKT
Gęstość w 15°C, g/cm^3	0,820 ÷ 0,845	0,914	0,860 ÷ 0,900
Lepkość w 40°C, mm^2/s	2,0 ÷ 4,5	34,6	3,5 ÷ 5,0
Liczba cetanowa (LC)	51	49	51
Temperatura zapłonu, °C	≥ 55	200	≥ 120
Zaniecz. stałe mg/kg	≤ 24		≤ 24
Zawart. siarki, mg/kg	50		≤ 10
Wartość opałowa, MJ/kg	≈42	37,7	36,7

33

Polityka energetyczna UE: Energy Package

Wytyczne polityki energetycznej dla UE z 8-9 marca 2007 r.

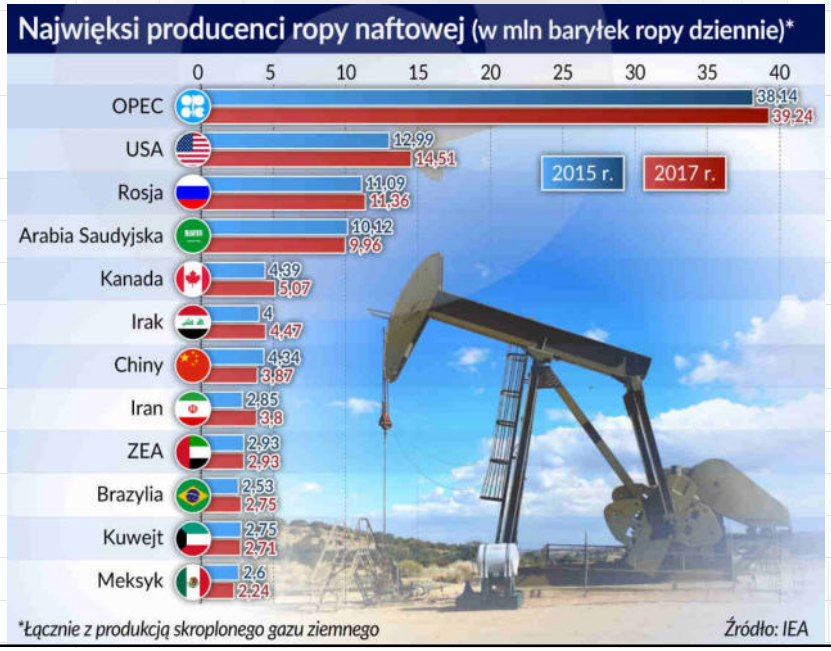
- proponowana strategia do 2020 r.: **3x20 +10%**

1. Udział odnawialnych źródeł wynoszący 20%
2. Wzrost sprawności o 20%
3. Zmniejszeni emisji CO_2 o 20%
4. Udział biopaliw w paliwach motorowych wynoszący 10%

Co z emisją CO_2 z napędów lotniczych?
Jak można ją ograniczyć?

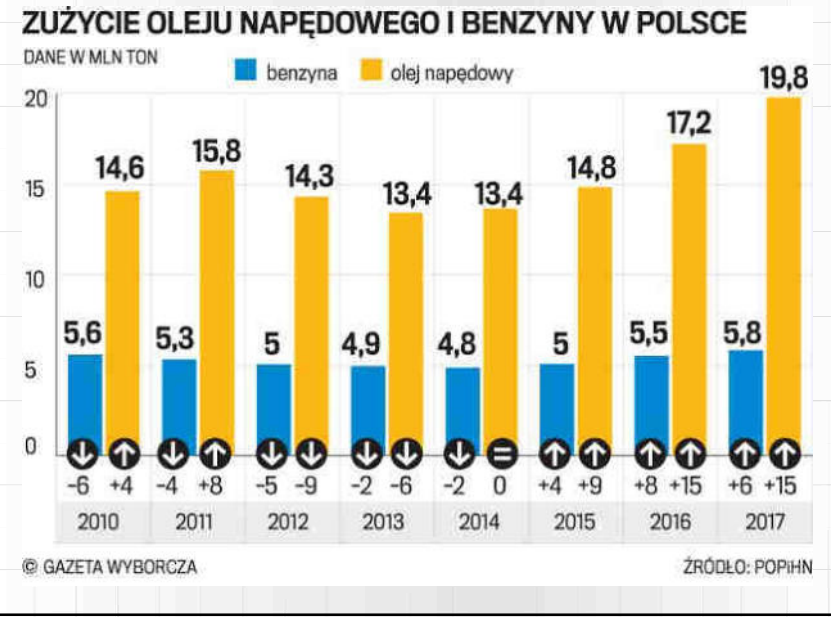
34

wydobycie ropy naftowej na Świecie



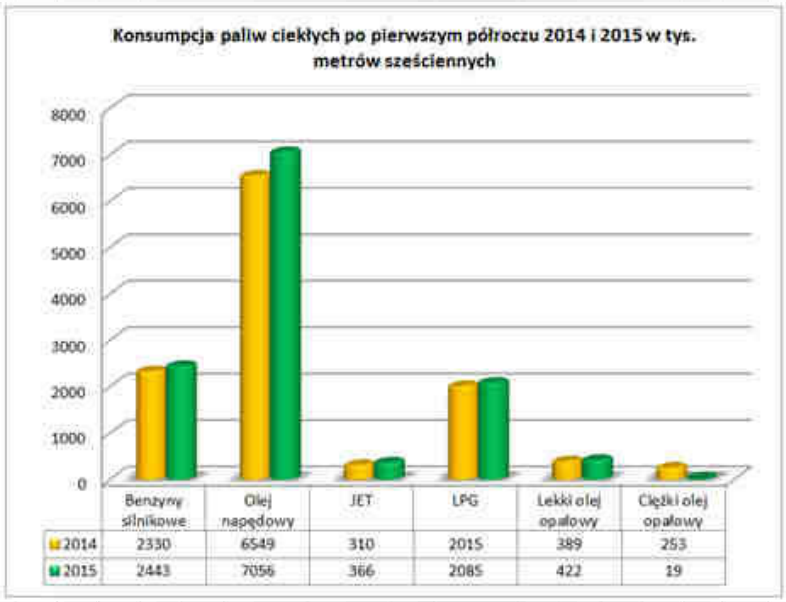
35

Zużycie paliw motorowych w Polsce



36

Zużycie paliw ciekłych w Polsce



	Benzyny silnikowe	Olej napędowy	JET	LPG	Lekki olej opałowy	Ciężki olej opałowy
2014	2330	6549	310	2015	389	253
2015	2443	7056	366	2085	422	19

37

Inne surowce do wytwarzania paliw ciekłych

TYPY REAKCJI CHEMICZNYCH

Jednocząsteczkowe (I – rzędu):

A → C+D (np. $C_2H_6 \rightarrow CH_3 + CH_3$)

Dwucząsteczkowe (II- rzędu):

A + B → C + D (np. $H + O_2 \rightarrow OH + O$)

Trójcząsteczkowe (III – rzędu):

A + B + M → C + M (np. $H+O_2+ M \rightarrow HO_2 + M$)

38

Składniki reakcji chemicznych (reagenty)

- Cząstki stabilne: O_2, H_2, N_2, CH_4 ...
- Cząstki wzbudzone: O_2^*, CO_2^*, N_2^*, ...
- Rodniki:

O, H, N, C, OH, HO_2, CH, CH_3, C_2H_5,...

Rodniki są to wolne atomy i fragmenty cząstek o nieparzystej liczbie elektronów lub dwóch elektronach niesparowanych.

39

SZYBKOŚĆ REAKCJI – WPŁYW TEMPERATURY

Prawo Arrheniusa

$$k = k_o \cdot e^{-E/(RT)}$$

k_o – współczynnik przedeksponencjalny

E – energia aktywacji (J/mol)

T – temperatura (K)

R – uniwersalna stała gazowa (J/(mol*K)

40

REAKCJE ELEMENTARNE

Reakcje elementarne zachodzą jako pojedyncze akty między reagentami, np.:

$$H + O_2 \rightarrow O + OH$$

Są to przede wszystkim reakcje rodnikowe, jak wyżej. Rząd ich reakcji odpowiada liczbie składników w reakcji.

41

REAKCJE ZŁOŻONE

Reakcje złożone to zapis reakcji między stabilnymi substratami, dającymi stabilne produkty, np.:

$$\mathbf{CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O}$$

Takiej reakcji nie ma, jest to tylko zapis związku substraty-produkty.

$$dC_A/dt = -k*C_A{}^{\alpha}C_B{}^{\beta}$$

gdzie: α i β są współczynnikami doświadczalnymi.

Naprawdę reakcje złożone składają się z wielu reakcji elementarnych (rodnikowych).

42

TYPY REAKCJI RODNIKOWYCH

1. Reakcje rozgałęzienia (rodników R):

$$R + A \rightarrow R_1 + R_2$$

2. Reakcje propagacji:

$$R_1 + A \rightarrow R_2 + B$$

3. Reakcje rekombinacji:

$$R + A + M \rightarrow AB + M$$

43

Reakcje spalania w układzie H_2+O_2

Znaczenie układu H_2+O_2: reakcje z tego układu występują w reakcjach wszystkich paliw kopalnych

Inicjacja spalania: mechanizm propagacji płomienia

$H + O_2 \rightarrow O + OH$	(r. rozgałęzienia)
$O + H_2 \rightarrow H + OH$	(r. rozgałęzienia)
$OH + H_2 \rightarrow H + H_2O$	(r. propagacji)
$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	(r. rekombinacji)

44

Reakcje spalania w układzie H_2+O_2

Rekombinacja rodników wnosi największy wkład do energii wewnętrznej spalin w strefie popłomiennej.

Strefa popłomienna

$$H + H + M \rightarrow H_2 + M$$
$$H + OH + M \rightarrow H_2O + M$$
$$OH + HO_2 + M \rightarrow H_2O + O_2 + M$$

Reakcje rekombinacji w strefie popłomiennej

45

Utlenianie CO

Znaczenie CO wynika stąd, że jest CO jest półproduktem spalania wszystkich paliw kopalnych i utlenia się powoli.

W płomieniu CO utlenia się prawie wyłącznie w reakcji:

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H \qquad (1)$$

Dlatego dla utleniania CO w płomieniu potrzebna jest w układzie woda.

Dodatkowo występuje trójmolekularna reakcja utleniania CO:

$$CO + O + M \rightarrow CO_2 + M$$

ale ma ona marginalne znaczenie w porównaniu z reakcją (1).

46

Utlenianie węglowodoró

Znaczenie utleniania węglowodorów wynika z faktu, że paliwa kopalne składają się z węglowodorów.

Utlenianie węglowodorów obejmuje bardzo złożone mechanizmy.

Generalnie można wyróżnić mechanizmy utleniania węglowodorów:

- niskotemperaturowy (zimne płomienie, silniki Diesla),
- wysokotemperaturowy (spalanie wysoko temperat.).

47

WYSOKOTEMPERATUROWE UTLENIANIE WĘGLOWODORÓW

W płomieniach ważny jest mechanizm wysoko-temperaturowy utleniania węglowodorów (RH, R -rodnik).

Utlenianie węglowodorów zaczyna się atakiem rodników:

$$RH + H \rightarrow R + H_2$$

$$RH + OH \rightarrow R + H_2O$$

$$RH + O \rightarrow R + OH$$

W dalszym ciągu następuje rozbicie rodników R na mniejsze rodniki, które w kolejnych reakcjach przekształcają się do półproduktów spalania CHO i CO, utlenianych w końcu do CO_2 i H_2O.

48

UTLENIANIE WĘGLOWODORÓW

UTLENIANIE WĘGLOWODORÓW – LICZBA REAKCJI

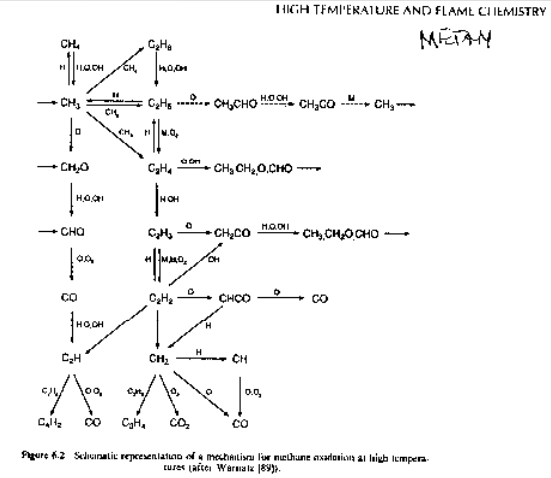


Figure 6.2 Schematic representation of a mechanism for methane oxidation at high temperatures (after Warnatz [89]).

Liczba reakcji elementarnych utleniania węglowodorów zależy od ich budowy i zawiera się w zakresie od kilkuset do kilku tysięcy.

Stechiometria reakcji chemicznych

Przykład reakcji chemicznej:

$$\mathbf{A + 2B \rightarrow C}$$

$$\mathbf{1\ mol + 2\ mole \rightarrow 1\ mol}$$

A, B i C są to reagenty. A i B są substratami, a C jest produktem.

Liczby występujące przed symbolami reagentów to: *współczynniki stechiometryczne*.

Ze związków między *współczynnikami stechiometrycznymi* wynika stechiometria spalania i inne pochodne pojęcia.

Stechiometria spalania – utlenianie węglowodorów

Paliwa kopalne to przede wszystkim związki węgla i wodoru (C_mH_n). Reakcję ich utleniania (spalania) można zapisać równaniem stechiometrycznym:

$$C_mH_n + (m + n/4)O_2 \rightarrow mCO_2 + n/2H_2O$$

$$1\ mol + (m + n/4)moli \rightarrow (m + n/2)moli$$

Jest to równanie stechiometrii spalania.

Na jeden mol paliwa C_mH_n przypada dokładnie: (m + n/4)moli tlenu

51

Skład mieszanki palnej

Skład mieszanki palnej jest **stechiometryczny**, jeżeli udziały paliwa i utleniacza wynikają z równania stechiometrii.

W wyniku zupełnego spalania mieszanki o składzie stechiometrycznym w spalinach nie może być ani paliwa, ani tlenu.

RODZAJ MIESZANKI		
Bogata	**Stechiometryczna**	**Uboga**
Nadmiar paliwa, niedomiar utleniacza	Skład stechiometryczny	Nadmiar utleniacza, niedomiar paliwa

52

Spalanie stechiometryczne CH_4

PRZYKŁAD: SPALANIE METANU W POWIETRZU

A. Spalanie stechiometryczne

Przyjęto skład powietrza obj.: 79% N_2 + 21% O_2

Reakcja metanu z tlenem w powietrzu:

$$CH_4 + 2O_2 + 7{,}52N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2$$

Uwaga spalanie jest zupełne: w spalinach nie ma metanu, ani tlenu.

53

Spalanie stechiometryczne CH_4

SKŁAD SPALIN

$$CH_4 + 2O_2 + 7{,}52N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2$$

Całkowita liczba moli spalin *N* równa się:

N = 1 mol CO_2 + 2 mole H_2O + 7,52 mola N_2 = 10,52 mole

Udziały molowe składników spalin, wg analizy *mokrej* (woda w postaci pary) przedstawiają się następująco:

$[CO_2]$ = 1mol CO_2/10,52 moli = 9,5% CO_2 obj.

$[H_2O]$ = 2 mole H_2O/10,52 moli = 19% H_2O obj.

$[N_2]$ = 7,52 mola N_2/10,52 moli = 71,5% N_2 obj.

54

Spalanie stechiometryczne CH_4

PRZYKŁAD: SPALANIE METANU W POWIETRZU

B. Spalanie z nadmiarem powietrza

Zakłada się nadmiar powietrza: 5%

$$CH_4 + 2{,}1O_2 + 7{,}9N_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}9N_2 + 0{,}1O_2$$

Uwaga: w spalinach jest tlen!

55

Spalanie CH_4 z nadmiarem powietrza

SKŁAD SPALIN

Całkowita liczba moli spalin *N* równa się:

N = 1 mol CO_2 + 2 mole H_2O + 7,9 mola N_2 + 0,1 mola O_2 = 11 moli

Udziały molowe składników spalin, wg analizy *mokrej* (woda w postaci pary) przedstawiają się następująco:

$[CO_2]$ = 1mol CO_2/11 moli = 9,09% CO_2 obj.

$[H_2O]$ = 2 mole H_2O/11 moli = 18,2% H_2O obj.

$[O_2]$ = 0,1 mola O_2/11 moli = 0,91% O_2 obj.

$[N_2]$ = 7,52 mola N_2/10,52 moli = 71,82% N_2 obj.

56

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania oznacza ilość powietrza przypadającego na jednostkę paliwa w **stechiometrycznej** mieszane palnej. Dla paliw gazowych określa się je w m^3/m^3 w warunkach normalnych.

Rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza do spalania zależy od założonego **nadmiaru** powietrza.

57

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

WSPÓŁCZYNNIK NADMIARU POWIETRZA (λ)

$$\lambda = \frac{\text{całkowita ilość powietrza do spalania}}{\text{teoretyczna ilość powietrza do spalania}}$$

$$\lambda = \frac{20,9}{20,9 - [O_2]}$$

58

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

WSPÓŁCZYNNIK EKWIWALENCJI (FUEL RATIO ϕ)

W literaturze angielskojęzycznej częściej niż współczynnikiem nadmiaru powietrza λ posługuje się współczynnikiem ϕ.

$$\phi = \frac{F/A}{(F/A)_s} \qquad \phi = \frac{1}{\lambda}$$

F – ilość moli paliwa,

A – ilość moli powietrza,

s - stechiometryczny

59

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

AIR/FUEL RATIO (AFR) i FUEL/AIR RATIO (FAR)

Ze względu na łatwość wyznaczania w praktyce zastosowanie ma stosunek strumienia powietrza do paliwa określany jako AFR (Air/Fuel Ratio). Podobnie definiuje się FAR (Fuel/Air Ratio).

AFR = F/A, kg/kg

A – strumień powietrza (A – air), kg/s

F – strumień paliwa (F – fuel), kg/s

W j. polskim AFR nazywa się współczynnikiem składu mieszanki i oznacza: α. Jednostki α: kg/kg

60

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Nadmiar powietrza (n)

$$n = \frac{\text{całkowita} - \text{teoretyczna ilość powietrza do spalania}}{\text{teoretyczna ilość powietrzdo spalania}}$$

Związek współczynnika nadmiaru pow. i nadmiaru powietrza

$$n = (\lambda - 1) * 100\%$$

61

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Gaz	Zapotrzebowanie powietrza (teoretyczne), m^3/ m^3
CO	2,38
H_2	2,38
CH_4	9,52
C_2H_2	11,90
C_2H_6	16,70
C_3H_8	23,80
Gaz ziemny L (ok. 82% CH_4)	7,80

62

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

PRZYKŁAD

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania CH_4 wynosi 9,52 m^3/m^3

Przyjmując:

- strumień metanu V = 10 m^3/h
- strumień powietrza V = 114,62 m^3/h

otrzymuje się:

$$\lambda = 114{,}62/(10*9{,}52) = 114{,}62/95{,}2 = 1{,}2$$

$$n = (1{,}2 - 1{,}0)*100\% = 20\%$$

63

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania oznacza ilość powietrza przypadającego na jednostkę paliwa w stechiometrycznej mieszance palnej. Oznaczając przez *c*, *h*, *s* i *o* udział węgla, wodoru, siarki i tlenu w paliwie teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania L_0 wyraża się w jednostkach masy wzorem:

$$L_o = \frac{1}{0{,}232}\left(\frac{8}{3}c + 8h - o + s\right),\ kg/kg_{paliwa}$$

$$L_o = 3{,}36\left(\frac{8}{3}c + 8h - o + s\right),\ m^3/kg_{paliwa}$$

64

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

W przypadku **paliw gazowych** składających się z wodoru, tlenku węgla, tlenu i węglowodorów o udziałach objętościowych odpowiednio: h_2, co, o_2 i c_α h_β teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania wyraża się w jednostkach objętości wzorem:

$$L_o = \frac{1}{0{,}21}\left[\frac{1}{2}(h_2 + co) - o_2 + \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right)c_\alpha h_\beta\right] \quad \mathrm{m^3/\,m^3}$$

65

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Najważniejsze składniki węgla: **c, h, s**, n, o, w, a = 1

wagowo	objętościowo
$C + O_2 = CO_2$ 1kmol C + 1 kmol O_2 = 1 kmol CO_2 12 kg C + 32 kg O_2 = 44 kg CO_2 1 kg C + 8/3 kg O_2 = 11/3 kg CO_2	**$C + O_2 = CO_2$** 1kmol C + 1 kmol O_2 = 1 kmol CO_2 12 kg C + 22,4 m^3 O2 = 22,4 m^3 CO2 1 kg C + 1,87 m^3O_2 = 1,87 m^3 CO_2
$S + O_2 = SO_2$ 1kmol S + 1 kmol O_2 = 1 kmol SO_2 32 kg C + 32 kg O_2 = 64 kg SO_2 1 kg S + 1 kg O_2 = 2 kg SO_2	**$S + O_2 = SO_2$** 1kmol S + 1 kmol O_2 = 1 kmol SO_2 32 kg S + 22,4 m^3 O2 = 22,4 m^3 SO_2 1 kg S + 0,7 m^3 O_2 = 0,7 m^3 SO_2
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$ 2 kmol H_2 + 1 kmol O_2 = 2 kmol H_2O 4 kg H_2 + 32 kg O_2 = 36 kg H_2O 1 kg H_2 + 8 kg O_2 = 9 kg H_2O	**$2H_2 + O_2 = 2H_2O$** 2 kmol H_2 + 1 kmol O_2 = 2 kmol H_2O 4 kg H_2 + 22,4 m^3 O2 = 44,8 m^3 H_2O 1 kg H2 + 5,6 m^3 O_2 = 11,2 m^3 H_2O
L_{O2}^{teor}= (8/3·c + s + 8·h - o)/100, kg_{O2}/kg_{pal}	L_{O2}^{teor} = (1,87·c + 5,6·h + 0,7·s - 0,7·o)/100 m^3_{nO2}/kg_{pal} O_2=16/22,4=0,7m^3
L_{pow}^{teor} = 1/0,232 · (8/3·c + s + 8·h - o) kg_{pow}/kg_{pal} L_{pow}^{teor} = 4,31 · (8/3·c + s + 8·h - o) kg_{pow}/kg_{pal} Bo: 0,232 - z udziału masowy O_2 w powietrzu (udziały obj. · ρ) m= (0,21*1,429)/(1*1,293)=0,232	L_{pow}^{teor} = (0,7/0,21)·(1,87·c + 0,7·s + 5,6·h - 0,7·o) /0,7 m^3_{pow}/kg_{pal} L_{pow}^{teor} = 3,33 · (8/3·c + s + 8·h - o) m^3_{pow}/kg_{pal} $L_o = 3{,}33\left(\frac{8}{3}c + 8h + s - o\right)$, m^3_{pow}/kg_{pal}

66

Skład spalin

$V''_{CO_2} = CO + n\,C_nH_m + CH_4 + CO_2$

$V''_{H_2O} = 2\,CH_4 + \frac{m}{2}\,C_nH_m + H_2 + H_2O$

$V''_{O_2} = 0{,}21V'_{Pmin}(\lambda - 1)$

$V''_{N_2} = 0{,}79\,V'_P + N_2$

V''_S

- produkt spalania
- składnik niepalny
- tlen

Dla paliw gazowych:

CO	CH_4	C_nH_m	H_2	O_2	CO_2	H_2O	N_2

$1um^3$ paliwa

$$V''_S = CO + CH_4 + n \cdot C_nH_m + CO_2 + 2CH_4 + \frac{m}{2} \cdot C_nH_m + H_2 + H_2O + 0{,}21V'_{Pmin}(\lambda - 1) + 0{,}79V'_P + N_2$$

um^3 spalin/um^3 pal

67

Zapotrzebowanie powietrza do spalania

Najważniejsze składniki paliw stałych (węgla): **c, h, s**, n, o, w, a = 1

Minimalna ilość tlenu, jaką należy dostarczyć do całkowitego spalenia 1kg paliwa wyniesie:

$$n_{Omin} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \quad \text{kmoli } O_2/\text{kg pal}$$

Ponieważ 1 kmol powietrza zawiera 0,21 kmola tlenu, więc minimalne zapotrzebowanie powietrza wyniesie:

$$n_{pmin} = \frac{n_{Omin}}{0{,}21} \quad \text{kmoli pow./kg pal}$$

Ale ponieważ 1 kmol zajmuje objętość 22,4nm³ to:

$$L_{Omin} = 22{,}4 \cdot \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \quad nm^3\ O_2/\text{kg pal}$$

$$L_{Omin} = 1{,}87c + 5{,}6h + 0{,}7s - 0{,}7o \quad nm^3\ O_2/\text{kg pal}$$

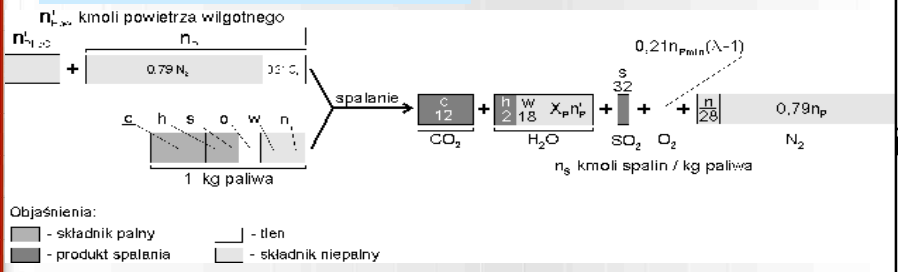
$$L_{pow.min} = 0{,}7/0{,}21 \cdot (2{,}67c + 8h + s - o) \quad nm^3\ O_2/\text{kg pal}$$

$$L_{pow.min} = 3{,}33 \cdot (2{,}67c + 8h + s - o) \quad nm^3\ O_2/\text{kg pal}$$

68

Skład spalin

Spalanie z nadmiarem powietrza λ>1



Objaśnienia:
- składnik palny
- produkt spalania
- tlen
- składnik niepalny

$$n''_S = \frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + X_P n'_P + 0{,}21 n'_{Pmin}(\lambda - 1) + 0{,}79 n'_P + \frac{n}{28} \quad \text{kmoli spalin/kg pal}$$

$n''_{CO_2} = \frac{c}{12}$	- ilość kilomoli CO_2 powstała ze spalenia węgla,
$n''_{H_2O} = \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + X_P n'_P$	– ilość kilomoli H_2O powstała ze spalenia wodoru, oraz woda zawarta w paliwie i powietrzu
$n''_{SO_2} = \frac{s}{32}$	- ilość kilomoli SO_2 powstała ze spalenia siarki,
$n''_{O_2} = 0{,}21 n_{pmin}(\lambda - 1)$	- ilość kilomoli tlenu z nadmiaru powietrza,
$n''_{N_2} = 0{,}79 n'_P + \frac{n}{28}$	- ilość kilomoli azotu z powietrza oraz azot zawarty w paliwie.

Skład spalin

Spalanie z nadmiarem powietrza λ>1

$$n''_S = \frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + X_P n'_P + 0{,}21 n'_{Pmin}(\lambda - 1) + 0{,}79 n'_P + \frac{n}{28} \quad \text{kmoli spalin/kg pal}$$

$r''_{CO_2} = \frac{c}{12\ n''_S}$	- udział molowy CO_2 w spalinach,
$r''_{H_2O} = \frac{h/2 + w/18 + X_P n'_P}{n''_S}$	- udział molowy H_2O w spalinach,
$r''_{SO_2} = \frac{s/32}{n''_S}$	- udział molowy SO_2 w spalinach,
$r''_{O_2} = \frac{0{,}21(\lambda - 1) n_{Pmin}}{n''_S}$	- udział molowy O_2 w spalinach,
$r''_{N_2} = \frac{0{,}79 n'_P + n/28}{n''_S}$	- udział molowy N_2 w spalinach.

$$r''_{CO_2} + r''_{H_2O} + r''_{SO_2} + r''_{O_2} + r''_{N_2} = 1$$

$$V''_S = 22{,}4\ n''_S \quad um^3 \text{spalin} / \text{kg pal}$$

Skład spalin

Spalanie z nadmiarem powietrza λ>1

$$n_S'' = \frac{c}{12} + \frac{s}{32} + \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + X_P n_P' + 0{,}21 n_{Pmin}' (\lambda - 1) + 0{,}79 n_P' + \frac{n}{28} \quad \text{kmoli spalin/kg pal}$$

$r_{CO_2}'' = \frac{c}{12\, n_S''}$	- udział molowy CO_2 w spalinach,
$r_{H_2O}'' = \frac{h/2 + w/18 + X_P n_P'}{n_S''}$	- udział molowy H_2O w spalinach,
$r_{SO_2}'' = \frac{s/32}{n_S''}$	- udział molowy SO_2 w spalinach,
$r_{O_2}'' = \frac{0{,}21(\lambda - 1) n_{Pmin}}{n_S''}$	- udział molowy O_2 w spalinach,
$r_{N_2}'' = \frac{0{,}79 n_P + n/28}{n_S''}$	- udział molowy N_2 w spalinach.

$$r_{CO_2}'' + r_{H_2O}'' + r_{SO_2}'' + r_{O_2}'' + r_{N_2}'' = 1$$

$$V_S'' = 22{,}4\, n_S'' \quad \text{um}^3\text{spalin/kg pal}$$

71

Skład spalin

Znając wzór ogólny paliwa: $\mathbf{C_n H_m O_k}$ można łatwo wyznaczyć zapotrzebowanoe powietrza oraz ilość i skład spalin.
Przyjmując z powyższego wzoru współczynniki **n**, **m**, **k** oraz masy molowe poszczególnych pierwiastków (węgla, wodoru i tlenu) obliczyć można masę molową paliwa:

$$M_{PAL} = n \cdot M_C + m \cdot M_H + k \cdot M_O, \quad \text{kg / kmol}$$

gdzie:
M_C = 12 kg/kmol – masa molowa węgla,
M_H = 1 kg/kmol – masa molowa wodoru atomowego,
M_O = 16 kg/kmol – masa molowa tlenu atomowego.

Następnie odnosimy masy poszczególnych składników do masy molowej paliwa i wyznaczamy ich udziały wagowe:

Udział gramowy węgla	Udział gramowy wodoru	Udział gramowy tlenu
$c = \frac{n \cdot M_C}{M_{PAL}}, \quad \text{kg C / kg pal}$	$h = \frac{m \cdot M_H}{M_{PAL}}, \quad \text{kg } H_2 \text{ / kg pal}$	$o = \frac{k \cdot M_O}{M_{PAL}}, \quad \text{kg } O_2 \text{ / kg pal}$

I dalej obliczenia jak poprzednio…

72

Mieszanka palna paliwa z powietrzem

<u>Mieszanka palna</u> to mieszanina powietrza z paliwem, w której:

po zniknięciu źródła zapłonu proces spalania rozwija się w niej samorzutnie.

RODZAJE MIESZANEK PALNYCH		
Bogata	Stechiometryczna	Uboga
$\lambda < 1$	$\lambda = 1$	$\lambda > 1$

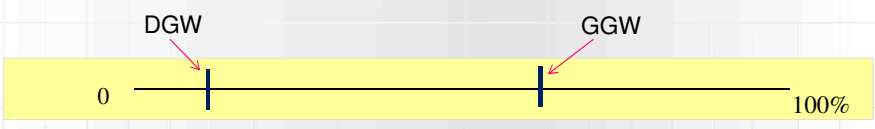
73

Stężeniowe granice zapłonu

Minimalne (maksymalne) stężenie paliwa w mieszance, w której może nastąpić zapłon.

DGW – dolna granica zapłonu (wybuchu)

GGW – górna granica zapłonu (wybuchu)



74

Stężeniowe granice zapłonu - przykłady

Gaz	Granice zapłonu			
	% gazu w powietrzu		% gazu w tlenie	
	dolna DGW	górna GGW	dolna DGW	górna GGW
Wodór	4,1	74,2	4,0	94,0
CO	12,5	74,2	15,5	94,0
Metan	5,3	14,0	5,1	61,0
Etan	3,2	12,5	3,0	66,0
Propan	2,4	9,5	2,3	55,0
Butan	1,9	8,4	1,8	48,0
Acetylen	2,5	80,0	2,5	89,4
Benzen	1,41	6,75	2,6	30,0
Metanol	6,72	36,5	–	–
Etanol	3,28	18,95	–	–

75

Zapłon mieszanki palnej

Zapłon jest to spowodowanie stanu spalania przez lokalne wywołanie intensywnej reakcji chemicznej w mieszance palnej.

Sposoby zapłonu mieszanki:

- wymuszony (np.. iskrą elektryczna ...),
- samozapłon.

76

Minimalna energia zapłonu

Definicja:

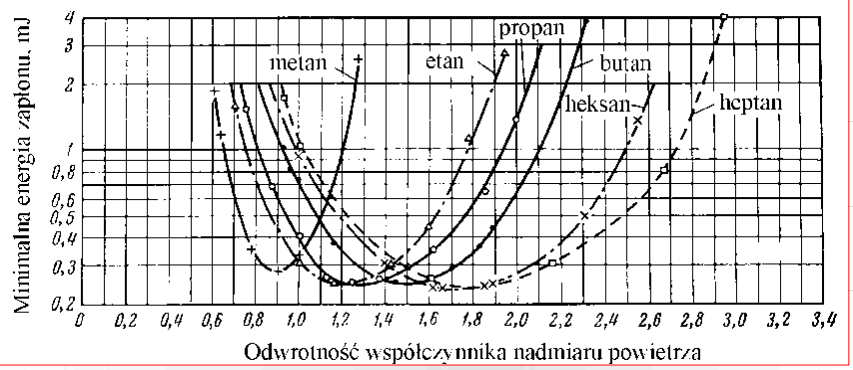
E_{min} – jest to najmniejsza ilość energii, która wywołuje zapłon w mieszance palnej [J].

Typowe E_{min} dla różnych paliw

- gazowe: < 1 mJ
- płynne: 10-100 mJ
- pyły: 0,1-1,0 J

77

Minimalna energia zapłonu dla gazów



Minimalna energia zapłonu różnych gazów w mieszaninie z powietrzem w zależności od składu mieszaniny palnej

78

Samozapłon

Samozapłon - jest to wywołanie stanu spalania (wybuchu) przez przekroczenie **temperatury** samozapłonu w mieszance palnej.

$T_{ot} > T_{kr}$

79

Dominujące czynniki w spalaniu paliw ciekłych

Czynniki dominujące :

- parowanie cieczy,
- mieszanie par z utleniaczem,
- kinetyka chemiczna spalania.

80

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem iskrowym (ZI)

- Do zainicjowania zapłonu mieszanki palnej w silniku o zapłonie iskrowym, potrzebne jest zewnętrzne źródło energii (elektrycznej).
- Generuje je układ zapłonowy silnika.
- Kąt, w którym następuje przeskok iskry nazywany jest kątem wyprzedzenia zapłonu.
- Jest on zależny od prędkości obrotowej silnika w danej chwili (im wyższa prędkość obrotowa silnika tym kąt wyprzedzenia zapłonu jest większy).

81

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem iskrowym (ZI)

Zapłon mieszanki palnej iskrą elektryczna może nastąpić jeżeli:

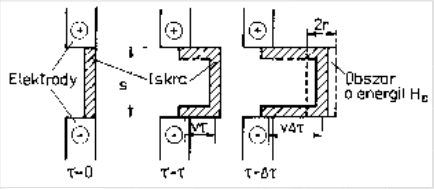
a) energia iskry jest większa od minimalnej energii zapłonu danej mieszanki,
b) odległość między elektrodami jest większa od odległości gaszącej danej mieszanki,
c) lokalny gradient prędkości jest większy od krytycznego dla danej mieszanki.

Przypomnienie: w cylindrze mieszanka jest w ruchu co utrudnia zapłon iskrowy.

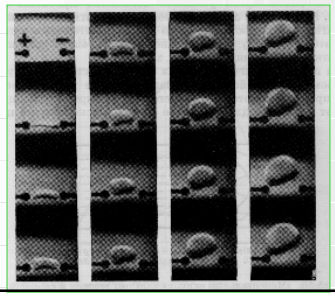
82

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem iskrowym (ZI)

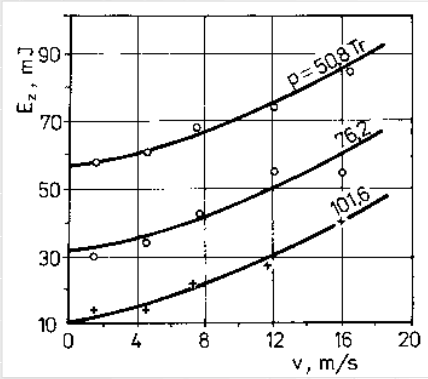
W cylindrze mieszanka jest w ruchu co utrudnia zapłon iskrowy.



Model zapłonu iskrowego w przepływie.



(Tor) 1 Tr = 1 mm Hg = 1/760 atm= 133,3224 Pa



Wpływ prędkości mieszanki na energię zapłonu

83

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem iskrowym (ZI)

1. Energia wyładowania iskrowego w świecach zapłonowych jest w zakresie: 50-100 mJ. To wystarcza do zapłonu mieszanki o składzie zbliżonym do stechiometrycznego, do zapłonu mieszanek ubogich może być niewystarczające.
2. Poprawę pewności zapłonu ubogiej mieszanki zapewnia się przez modyfikację układu zapłonowego:
   - Układy wieloświecowe,
   - Zwiększenie energii zapłonu przez:
     - zwiększenie energii wyładowania,
     - zapłon plazmowy,
     - zapłon laserowy.
   - Zwiększenie odległości między elektrodami.

84

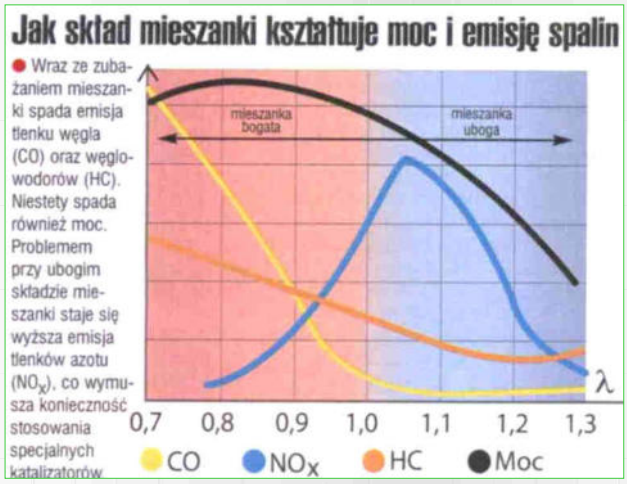
Spalanie ubogich mieszanek

1. Dominującą tendencją jest spalanie ubogich mieszanek ($\lambda>>1$), ponieważ poprawia w ten sposób sprawność silnika oraz maleje emisja NO_x, natomiast nadmiar tlenu w spalinach sprzyja dopaleniu CO i HC.
2. Spalanie ubogich mieszanek w silnikach spalinowych ZI wiąże się z trudnościami:
   a) stężeniowe granice palności
   b) mniejsza prędkość spalania laminarnego,
   c) utrudniony zapłon.

85

Spalanie ubogich mieszanek

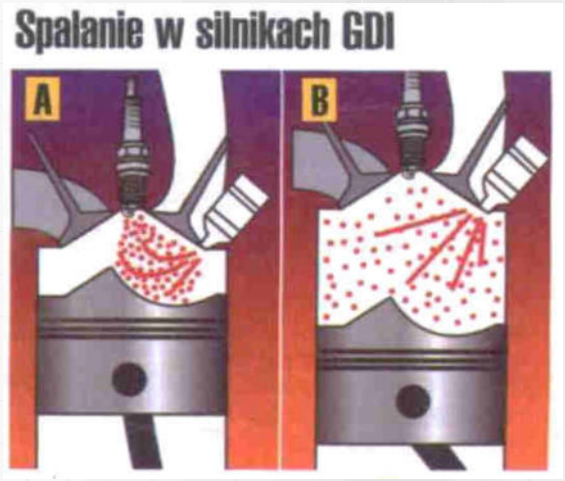
Wpływ składu mieszanki na moc i emisję zanieczyszczeń



86

Spalanie ubogich mieszanek

Spalanie ładunku uwarstwionego w silnikach GDI (Gasoline Direct Injection)

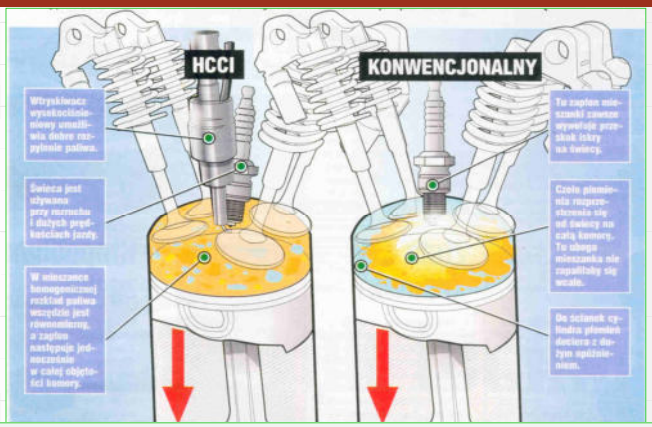


Ładunek uwarstwiony

Ładunek konwencjonalny

87

Spalanie ubogich mieszanek



Silnik spalania mieszanki jednorodnej z zapłonem samoczynnym HCCI (ang. Homogeneous Charge Compression Ignition) – rodzaj silnika spalinowego tłokowego, w którym w początkowym etapie po uruchomieniu, gdy silnik jest jeszcze zimny, zapłon odbywa się za pomocą układu iskrowego, jak w zwykłym silniku benzynowym, a kiedy silnik osiągnie już nominalną temperaturę silnik przechodzi na pracę w trybie samozapłonu jak silnik Diesla. Jest to sposób, w którym uzyskujemy lepsze spalanie paliwa. Jednak aby to było możliwe paliwo musi być jednorodnie rozmieszczone w całej komorze spalania. Dlatego stosuje się wysokociśnieniowy wtryskiwacz.

Spalanie ubogich mieszanek w silniku z homogenicznym zapłonem samoczynnym HCCI

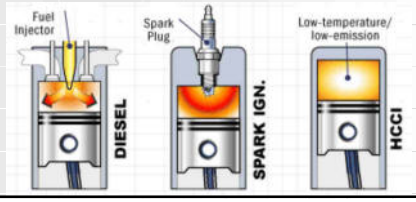
1. Rodzaj mieszanki:	homogeniczna
2. Skład mieszanki:	**uboga**
3. Rodzaj zapłonu:	samoczynny

Mechanizm zapłonu: (jak w silnikach ZS)

a) Faza sprężania (wzrost temperatury mieszanki)

b) Faza niskotemperaturowego wydzielania ciepła (LTHR)

c) Faza wysokotemperaturowego wydzielania ciepła (HTHR)



89

Spalanie ubogich mieszanek

Porównanie HCCI z konwencjonalnym silnikiem ZI

Wyższa sprawność wynikająca z:

- eliminacji strat związanych z dławieniem,
- zastosowania wyższych stopni sprężania (wartości porównywalne do tych, które stosuje się w silnikach Diesla z bezpośrednim wtryskiem paliwa),
- krótszych czasów spalania (równoczesne podpalenie ładunku w wielu miejscach - płomień nie rozprzestrzenia się w cylindrze);

Zredukowana emisja NOx

- uboższa mieszanka,
- niższa temperatura spalania.

90

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem zamoczynnym (ZS)

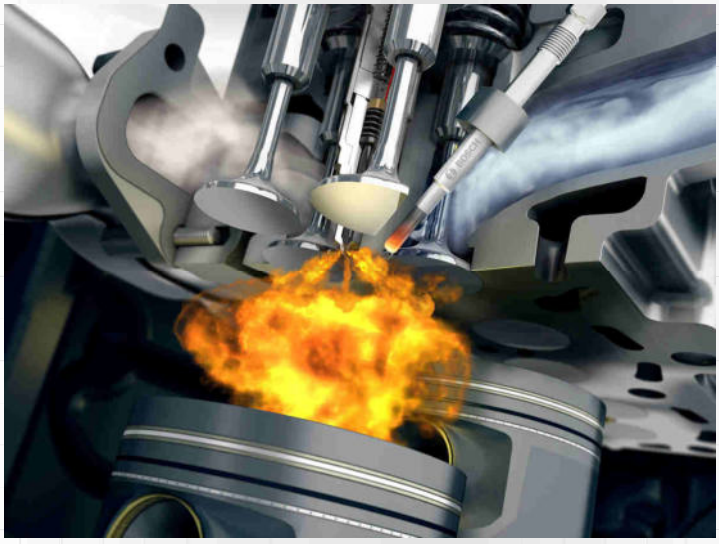
Proces spalania w silnikach z zapłonem samoczynnym ZI:

- w czasie procesu napełniania cylindra dopływa do niego tylko powietrze,
- w końcu procesu sprężania doprowadzone jest do niego paliwo,
- mieszanka palna tworzy się wewnątrz cylindra

(jest to wewnętrzny sposób tworzenia mieszanki palnej/wtrysk bezpośredni).

91

Zapłon mieszanki w silniku spalinowym z zapłonem zamoczynnym (ZS)



Obraz: https://www.motofakty.pl/artykul/uklady-wtryskowe-w-dieslach-konstrukcja-zalety-i-wady.html

92

Przebieg procesu spalania w silnikach spalinowych ZS

I. Okres opóźnienia zapłonu
II. Okres spalania kinetycznego
III. Okres spalania dyfuzyjnego
IV. Okres dopalania

93

Przebieg procesu spalania w silnikach spalinowych ZS

I. Parowanie kropel oleju napędowego.
II. Powstaje mieszanka par oleju z powietrzem.
III. Niskotemperaturowe utlenianie węglowodorów z wytwarzaniem wodoronadtlenów.
IV. Rozpad wodoronadtlenów i przejście do fazy zapłonu gorącego.
V. Odparowana część oleju ulega gwałtownemu spaleniu.
VI. Palą się krople oleju w reżimie dyfuzyjnym.
VII. Dopalana jest pozostałość (CO, HC, koksik sadza,...).

94

Opóźnienie zapłonu

I. Wtrysk paliwa zaczyna się kiedy temperatura powietrza przekroczy temperaturę samozapłonu paliwa (ok. 300C).

II. Samozapłon następuje jednak z opóźnieniem: czas opóźnienia zapłonu.

III. Czas opóźnienia zapłonu składa się z czasu opóźnienia fizycznego i chemicznego (0,7-3 ms).

IV. Czas opóźnienia fizycznego liczy się od momentu wtrysku do momentu wytworzenia palnej mieszanki par i powietrza.

V. Chemiczny czas opóźnienia liczy się do chwili wystąpienia wzrostu ciśnienia (indykatorowego).

95

Opóźnienie zapłonu

1. Im większy czas opóźnienia zapłonu, tym więcej paliwa (oleju) gromadzi się cylindrze i tym gwałtowniej przebiega pierwsza, kinetyczna faza spalania.
2. Zbyt gwałtowne spalanie w tym okresie powoduje hałaśliwą pracę silnika.
3. Typowy czas opóźnienia zapłonu w silniku ZS to ok. 1 ms, kiedy jest on ponad 2 ms praca silnika staje się hałaśliwa.
4. Ze względu na działanie silnika najlepiej, żeby opóźnienie zapłonu było jak najmniejsze, tym mniejsze im większa jest prędkość obrotowa.

96

Temperatury samozapłonu wybranych paliw

Rodzaj paliwa	Temperatura, °C
Olej napędowy	233 (LC=41), 230 (LC=45), 225 (LC=55)
Benzyna	440-470
Alkohol etylowy	558, 426, 365
Alkohol metylowy	574, 470, 464, 385
Metan	632, 537, 540
Propan	493, 450, 466, 504
n-Butan	408, 543, 477
Wodór	572, 400

Im większa gęstość tym niższa temperatura samozapłonu.

97

Zapłon paliwa w silnikach turbinowych

Najważniejsze sposób zapłonu paliwa - **zapłon iskrą elektryczną**

A ponadto możliwe jest zastosowanie:

- zapłonu świecą żarową (gł. jako źródło dodatkowe w przypadku gwałtownego wygaśnięcia płomienia)
- zapłonu od gorącej powierzchni (rzadko stosowany, mało efektywny)
- zapłonu za pomocą strumienia plazmy (w sferze badań)
- zapłonu chemicznego (wywołany wybuchem ładunku chemicznego
- zapłonu laserowego (w sferze badań)
- zapłonu gazowego (gazowo-iskrowy z zastosowaniem dodatkowej ilości gazu palnego)
- zapłonu tlenowego (zastosowanie dodatkowej ilości tlenu ułatwiającej niezawodny zapłon rozpylonego paliwa za pomocą iskry)

98

Stabilność płomienia

1. Płomień jest stabilny jeżeli po ustaniu źródła zakłóceń wraca do pierwotnej postaci
2. Płomień jest stabilny jeżeli jest odporny na małe zaburzenia
3. Zakres wartości poszczególnych parametrów, dla których istnienie płomienia jest możliwe (głównie prędkości przepływu i współczynnika nadmiaru powietrza)

99

Znaczenie stabilności płomienia

1. Prawidłowa praca komory spalania zależy od stabilności płomienia
2. W napędach lotniczych stabilność spalania jest warunkiem bezpieczeństwa
3. Stabilność płomienia musi być zachowana w każdych warunkach pracy silnika lotniczego

100

Znaczenie stabilności płomienia

Zagadnienie stabilności i konieczność stosowania zespołu ustateczniającego płomień występuje zawsze, gdy prędkość przepływu jest większa od prędkości spalania.

Zadaniem stabilizatorów jest stworzenie warunków sprzyjających do trwałego palenia się płomienia przez:

• zmniejszenie lokalnej prędkości przepływu do wartości rzędu 2 ÷ 5 m/s,

• wywołanie charakterystycznych recyrkulacji, które przyspieszają tworzenie świeżej mieszanki palnej.

101

Negatywne skutki stabilizowania płomienia

Zastosowanie stabilizacji płomienia może powodować, że:

- powiększają się straty przepływu,
- zwiększa się masa nagaru na ściankach rury ogniowej
- zwiększa się nierównomierność rozkładu temperatur, z którą wiąże się niebezpieczeństwo lokalnego przegrzewania rury ogniowej

102

Czynniki wpływające na stateczność spalania

- prędkość przepływu
- rodzaj paliwa (lotność paliwa, temperatura zapłonu, stężeniowe granice zapłonu, prędkość spalania)
- skład mieszanki palnej (współczynnik nadmiaru powietrza)
- parametry ośrodka (ciśnienie, temperatura)
- mieszanie paliwa i utleniacza
- geometria komory spalania
- rodzaj stabilizatora

103

Prędkość propagacji płomienia a jego stabilność

Jednym z warunków stabilności płomienia jest, aby co najmniej w jednym punkcie składowa prędkości przepływu (normalna do czoła płomienia) była równa prędkości płomienia:

$$U_n = V$$

U_n – normalna prędkość spalania

V – prędkość wypływu mieszanki

Jeżeli $U_n > V$ to płomień „wskakuje" do wnętrza palnika

Jeżeli $U_n < V$ to płomień się „urywa"

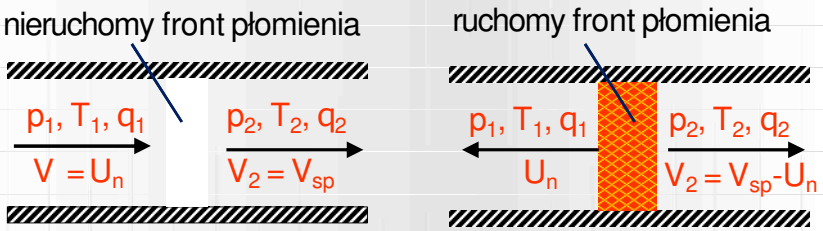
Prędkość propagacji laminarnego płomienia węglowodorowego wynosi około 0,5 m/s

104

Prędkość propagacji płomienia

Prędkość propagacji płomienia należy do jednych z podstawowych parametrów niezbędnych przy projektowaniu palników, komór spalania czy zabezpieczeń przeciwwybuchowych.

Prędkość rozchodzenia się czoła laminarnego płomienia względem świeżej mieszanki (lub ścian przewodu) nazywana jest prędkością spalania U_n.



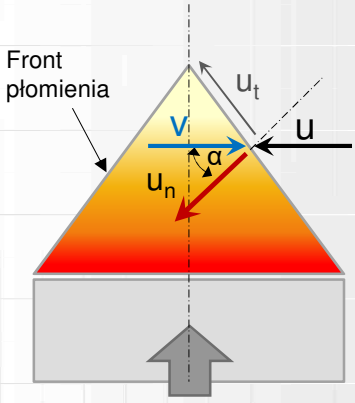
105

Wyznaczanie prędkości propagacji płomienia

Kierunek propagacji płomienia
Kierunek przepływu mieszanki palnej

v – prędkość gazu, u - prędkość przemieszczania się czoła płomienia

Prędkość przemieszczania się czoła płomienia może być rozłożona na dwa wektory: normalny $\boldsymbol{u}_n$ i styczny $\boldsymbol{u}_t$.



$$\frac{u_n}{u} = \cos\alpha$$

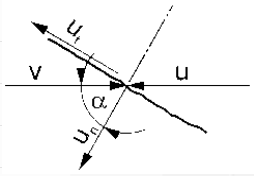
prawo Michelsona:

aby czoło płomienia było w danym punkcie ustalone, musi ono być nachylone (w tym punkcie) do prędkości *v* pod takim kątem α, aby rzut wektora *v* prędkości napływającego strumienia na normalną do czoła płomienia był równy prędkości spalania laminarnego u_n.

106

Wyznaczanie prędkości propagacji płomienia

v – prędkość gazu, u - prędkość przemieszczania się czoła płomienia



Czoło płomienia ma być nieruchome (względem ścian rury) więc $\mathbf{v = u}$

$$\frac{u_n}{v} = \cos\alpha$$

Z prawa Michelsona wynika wniosek, że przy ustalonej wartości v, jeżeli zwiększeniu ulegnie wartość u_n, to kąt α ulegnie zmniejszeniu; w granicznym przypadku, gdy $v = u_n$, czoło płomienia będzie prostopadłe do wektora $\boldsymbol{v}$.

Odkrycie prawa Michelsona pozwoliło na jednoznaczne zdefiniowanie prędkości spalania laminarnego, opracowanie metod jej pomiaru i eksperymentalnie wykazać, że u_n jest rzeczywiście stałą fizykochemiczną mieszaniny palnej.

Prędkość propagacji płomienia dla różnych paliw

Paliwo	Współczynnik nadmiaru powietrza	Prędkość propagacji płomienia Un_{max}, m/s
Wodór	1,8	3,25
Tlenek węgla	2,05	0,52
Metan	1,08	0,45
Etan	1,14	0,48
Propan	1,06	0,46
Acetylen	1,25	1,55
Metanol	1,08	0,50
Siarkowodór	0,9	0,41
Etylen	1,13	0,74

108

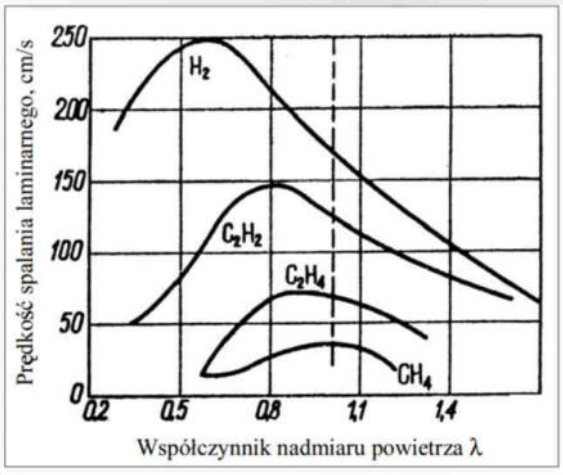
Czynniki wpływające na prędkość propagacji płomienia

Podstawowe czynniki to:

- rodzaj paliwa
- rozmiar cząstek paliwa,
- skład mieszanki palnej (maksimum przy określonym składzie),
- temperatura świeżej mieszanki (ze wzrostem temperatury rośnie),
- ciśnienie (ze wzrostem ciśnienia maleje).

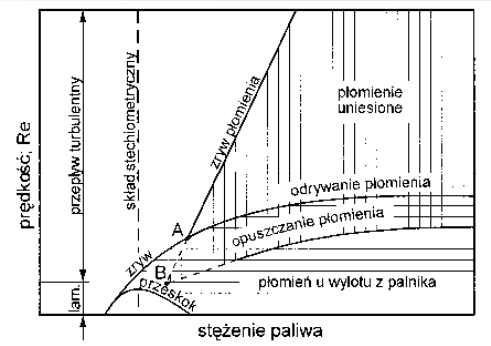
109

Prędkość propagacji płomienia laminarnego



110

Stabilność płomieni w przestrzeni otwartej



Jeżeli zmniejszać prędkość strumienia gazu tak, że prędkość rozchodzenia się czoła płomienia przewyższy ją, płomień **przeskoczy do wnętrza palnika** (w obszarze pod krzywą przeskoku). Z drugiej strony, podczas zwiększania prędkości strumienia może nastąpić albo **zerwanie** (jeżeli stężenia leżą na lewo od punktu A), albo **oderwanie** od wylotu palnika (jeżeli stężenia leżą na prawo od punktu A). Dalszy wzrost prędkości prowadzi w końcu do przekroczenia krzywej zerwania płomienia. W obszarze zakratkowanym płomień może znajdować się bądź u wylotu z palnika, bądź być uniesiony. Powrót uniesionego płomienia z powrotem do wylotu palnika wymaga jednak znacznego zmniejszenia prędkości (przejścia przez linię opuszczania płomienia).

Typy płomieni a ich stabilność

- płomienie kinetyczne laminarne łatwo ulegają przeskokowi
- płomienie kinetyczne turbulentne łatwo ulegają zerwaniu
- płomienie bogate i dyfuzyjne wykazują większą stabilność
- Intensywne mieszanie turbulentne może prowadzić do zbytniego wzrostu doprowadzania powietrza i zerwania płomienia na skutek przekroczenia dolnej granicy zapłonu
- powrót uniesionego płomienia z powrotem do wyloty palnika wymaga znacznego obniżenia prędkości wypływu paliwa.

112

Sposoby stabilizacji płomieni i rozwiązania stateczników

Sposoby stabilizacji płomieni:

- w warstwie granicznej
- przez doprowadzenie energii z zewnątrz
- recyrkulacja spalin
- zawirowanie przepływu (aerodynamika)

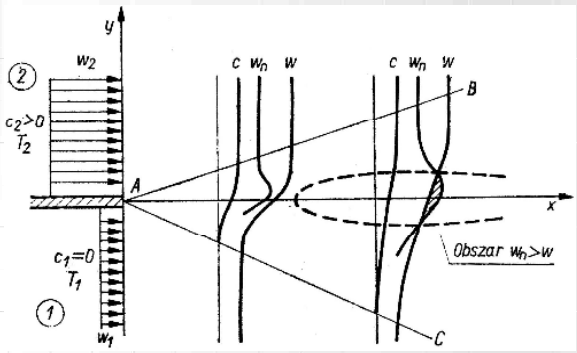
Rozwiązania stateczników (stabilizatorów):

- stateczniki stożkowe
- stateczniki strugowe
- zawirowywacze łopatkowe
- obieg zwrotny (odwracanie kierunku przepływu)

113

Stabilizacja płomienia w warstwie przyściennej

Temperatura obu strug jest dużo mniejsza od temperatury zapłonu. W jednym ze strumieni prędkość przepływu jest zawsze większa od prędkości spalania, w drugim (na pewnym odcinku) jest obszar gdzie prędkość spalania jest większa (obszar linii przerywanej) i w przypadku zapłonu mieszanki w tym miejscu powstały płomień cofnie się do punktu, w którym $U_n = V$.



I – struga czynnika otaczającego

2 – struga mieszanki palnej,

g – koncentracja paliwa,

w_n – prędkość spalania,

w – prędkość przepływu

114

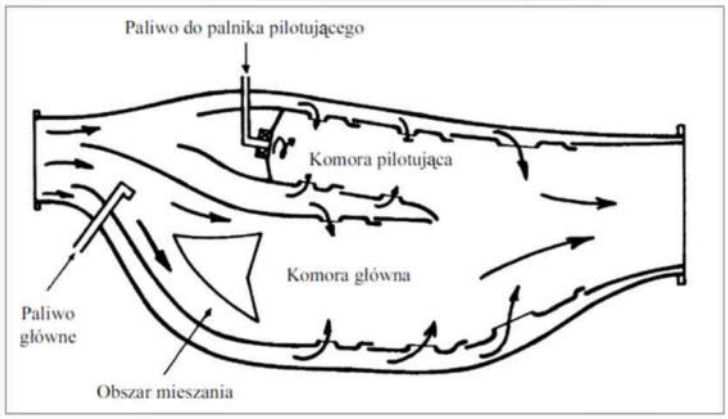
Stabilizacja przez energię doprowadzoną z zewnątrz

Doprowadzenie dodatkowej energii cieplnej może być realizowane przez:

- Płomień pilotujący,
- Strumień gorących spalin
- Gorące elementy

115

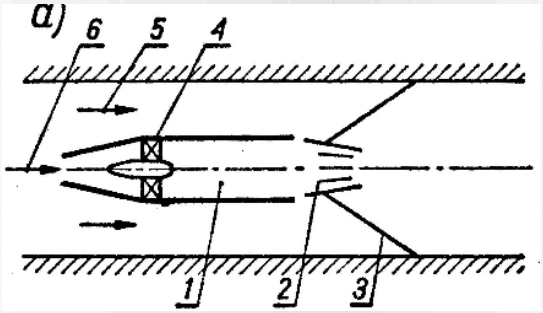
Stabilizacja przez wykorzystanie płomienia pilotującego



116

Stabilizacja płomienia gorącymi spalinami

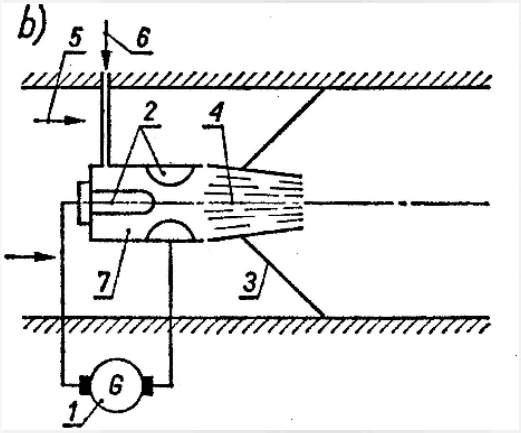
Ustatecznienie płomienia za pomocą gorących spalin polega na wykorzystaniu wymiany ciepła i w efekcie zapłonu mieszanki palnej w pobliżu ścianki, gdzie $U_n = V$.



1 – komora wstępna, 2 – gorące spaliny lub płomień, 3 – czoło płomienia rozprzestrzeniającego się w strudze mieszanki, 4 – system stabilizacji w komorze wstępnej, 5, 6 – kierunek przepływu mieszanki

117

Stabilizacja płomieni za pomocą plazmy

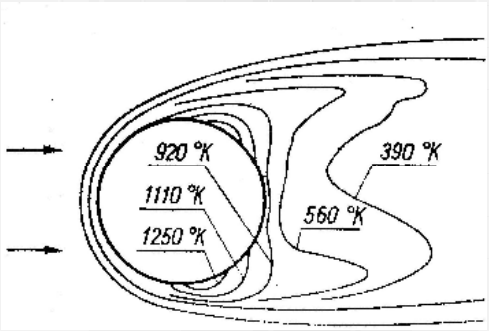


1 – generator prądu elektrycznego, 2 – elektrody, 3 – czoło płomienia rozprzestrzeniającego się w strudze mieszanki, 4 – struga plazmy, 5 – kierunek przepływu mieszanki, 6 – przepływ czynnika roboczego, 7 – generator plazmy

118

Stabilizacja płomieni gorącymi elementami

Przepływająca mieszanka na skutek wymiany ciepła ogrzewa się, co prowadzi do zapłonu w pobliżu gorącej ścianki. Płomień stabilizuje się w pewnej odległości od ścianki, przy której $U_n = V$.



Rozkład temperatury za metalowym walcem nagrzanym do l300K i opływanym przez strumie powietrza atmosferycznego z prędkością l0 m/s

119

Stabilizacja płomieni gorącymi spalinami

Stabilizacja gorącymi spalinami:

- pilotujący płomień,
- recyrkulacja spalin.

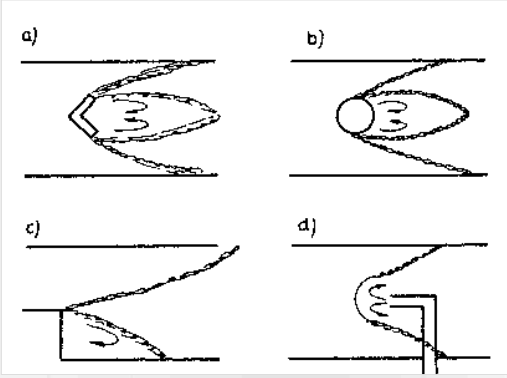
Recyrkulacja:

- zewnętrzna,
- wewnętrzna.

120

Stabilizacja płomieni przez recyrkulację spalin

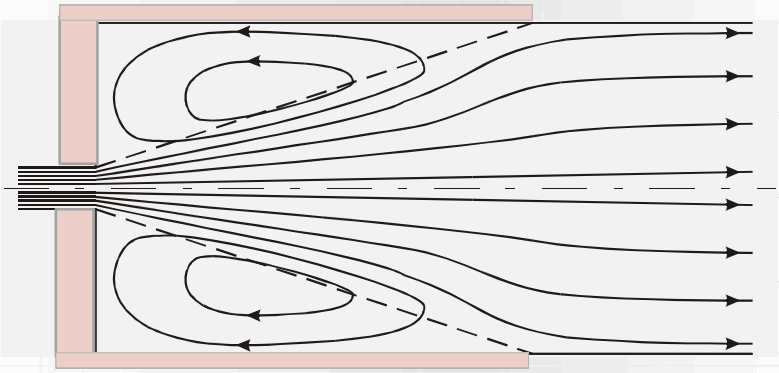
Recyrkulacja spalin może być wywołana umieszczeniem w przepływie ciał nie opływowych lub silnym zawirowaniem strugi.



Przykłady generatorów przepływów recyrkulacyjnych

121

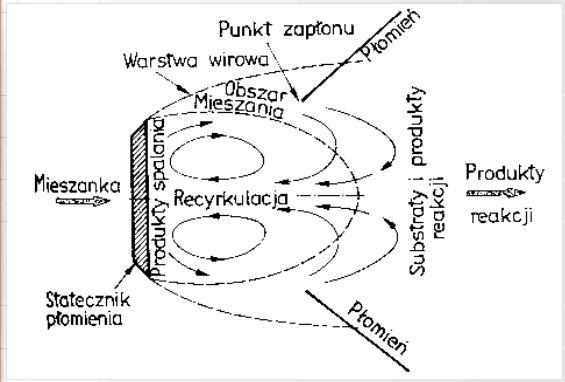
Recyrkulacja zewnętrzna

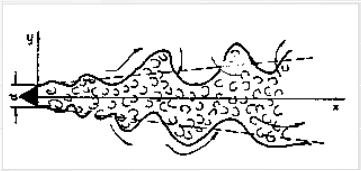


Recyrkulacja zewnętrzna wywołana działaniem strugi

122

Recyrkulacja wewnętrzna przez ciało nieopływowe





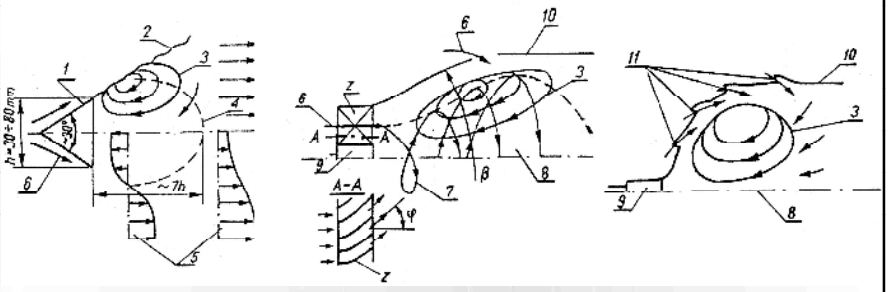
123

Wpływ ciała nieopływowego

- temperatura w strefie recyrkulacji sięga 90% wartości adiabatycznej temperatury spalania,
- lokalna redukcja prędkości i generacja prądów zwrotnych,
- intensywność turbulencji sięga 50%,
- intensywna wymiana masy i przekazywanie ciepła (przyspieszenie uzyskania jednorodnej mieszanki),

124

Rodzaje stateczników

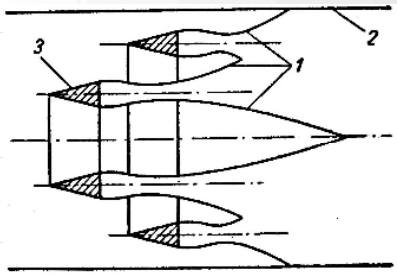


Statecznik stożkowy | Statecznik łopatkowy | Statecznik klinowy

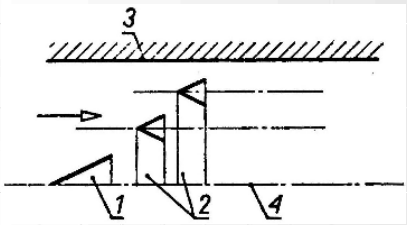
I – statecznik klinowy, 2 – czoło płomienia, 3 – strefa zawirowań, 4 – granica prądów zwrotnych, 5 – profile rozkładu prędkości, 6 – powietrze, 7 – zawirowanie wywołane łopatkami zawirowywacza, 8 – strefa podciśnienia, 9 – wtryskiwacz, I0 – ściana rury ogniowej, II – szczeliny wprowadzające, z – łopatki zawirowywacza,

125

Układy stateczników



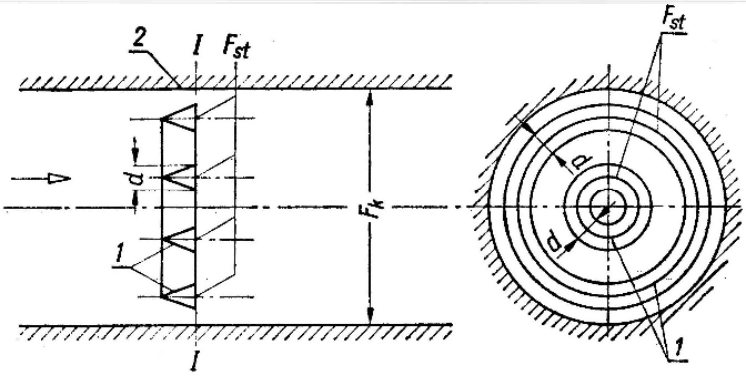
Układ z dwoma pierścieniowymi statecznikami płomienia:
1- czoło płomienia
2- ścianka komory
3- stateczniki



Układ stateczników w komorze spalania:
1- stabilizator stożkowy
2- stabilizatory pierścieniowe
3- ścianka komory spalania
4- oś komory

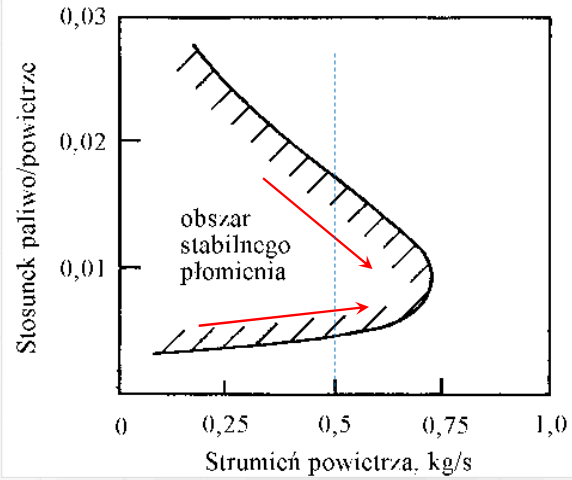
126

Układy stateczników



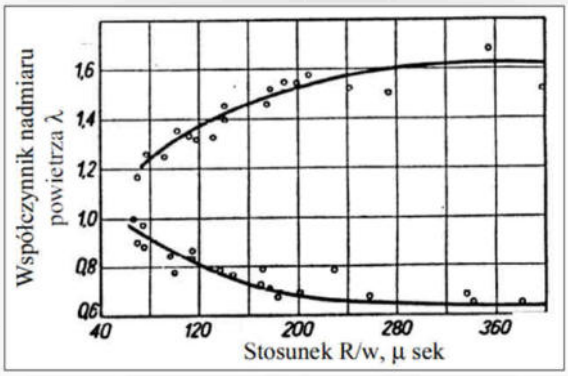
Układ pierścieniowych stateczników płomienia:
I – stabilizatory płomienia, 2 – ścianki komory spalania, F_{st} – pole powierzchni czołowej stabilizatorów, F_o – pole powierzchni przekroju poprzecznego, d – charakterystyczny wymiar stabilizatora

Charakterystyka statecznika



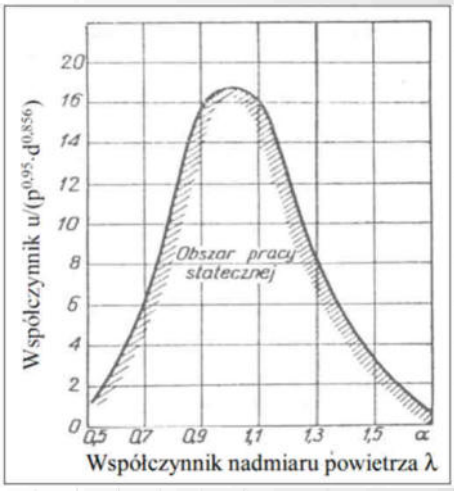
Zakres stabilności spalania

Wpływ rozmiaru statecznika



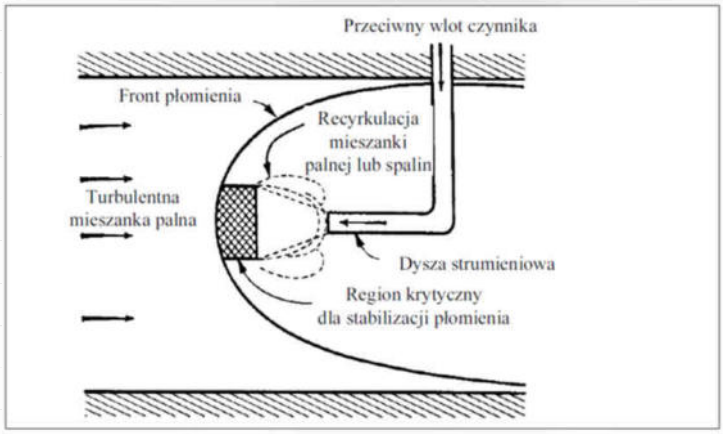
Wpływ charakterystycznego dla statecznika stosunku R/w na zakres stateczności mieszanek nafta-powietrze:
R – połowa charakterystycznego wymiaru stabilizatora,
w – prędkość w przekroju statecznika

Wpływ prędkości na zakres stabilności



Charakterystyka stateczników płomienia:
p – ciśnienie panujące w komorze
u – prędkość przepływu w płaszczyźnie statecznika
d –charakterystyczny wymiar statecznika

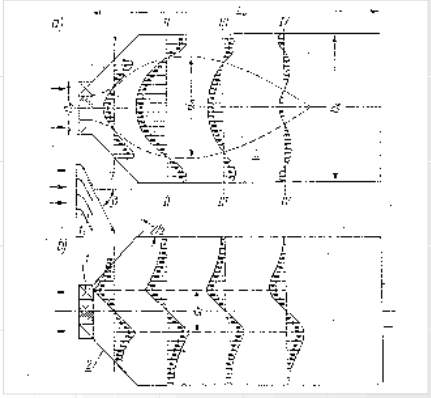
Stabilizacja płomienia przez przeciwne skierowanie strugi

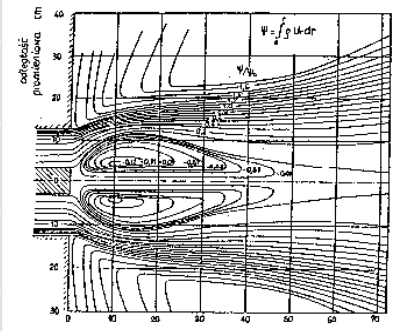


131

Stabilizacja płomienia przez zawirowanie strugi

Silne zawirowanie przepływu (liczba wiru S > 0,6) powoduje wywołanie recyrkulacji i w rezultacie stabilizację płomienia





132

Stabilizacja płomienia przez zawirowanie strugi

Liczba wiru S = $G_\phi/(0{,}5\ G_x d_o)$

G_x - strumień pędu osiowego,

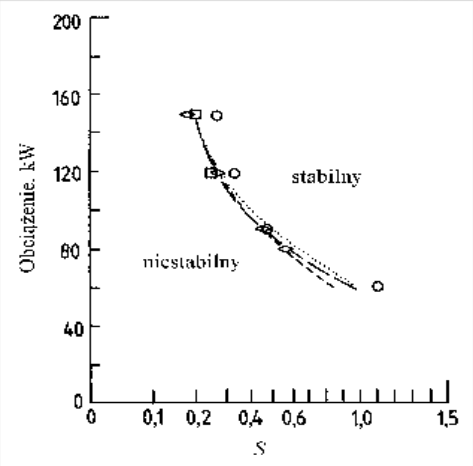
$$G_x = \int_0^R u\rho u 2\pi r dr + \int_0^R P 2\pi r dr$$

G_ϕ- strumień pędu obwodowego

$$G_\phi = \int_0^R (wr)\rho u 2\pi r dr,$$

133

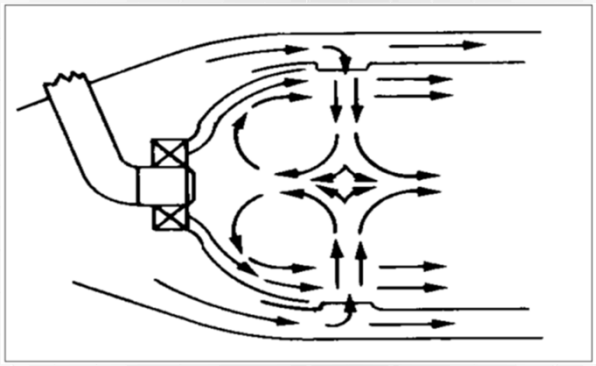
Charakterystyka stateczności zawirowanego płomienia



Wpływ liczby wiru *S* na zakres stabilności płomienia pyłowego

134

Stabilizacja spalania zawirowaniem i przeciwprądem



135

Sposoby zwiększenia stabilności płomienia

- zwiększenie wymiarów stabilizatora,
- zwiększenie temperatury początkowej mieszaniny,
- zbliżenie się do stechiometrycznych warunków spalania,
- zwiększenie ciśnienia statycznego przepływu,
- zmniejszenie intensywności turbulencji w przepływie głównym,
- lepsze rozdrobnienie paliwa,
- większy udział lotnych składników w paliwie ciekłym,

136

Sposoby zwiększenia stabilności ubogich płomieni

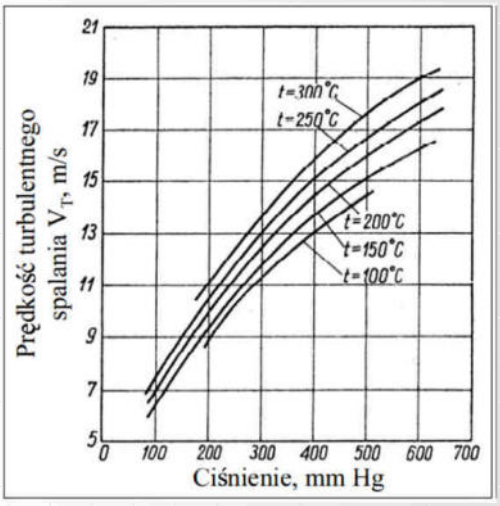
Zasilanie komór spalania ubogimi mieszankami ($\lambda = 2 \div 4$) stwarza zagrożenie zerwania płomienia (zwłaszcza przy niskim obciążeniu silnika.

Stabilność płomienia zapewnia się przez:

- sekwencyjne systemy spalania,
- regulowane zawirowanie powietrza,
- zmienną geometrię komory spalania,
- stosowanie pomocniczych palników dyfuzyjnych

137

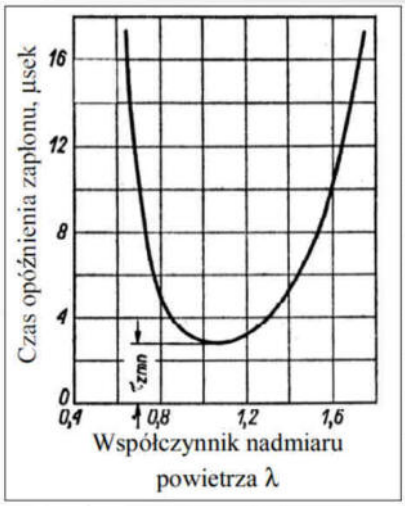
Wpływ temperatury początkowej mieszanki



Zależność prędkości turbulentnego spalania od ciśnienia i temperatury

138

Wpływ składu mieszanki na opóźnienie zapłonu

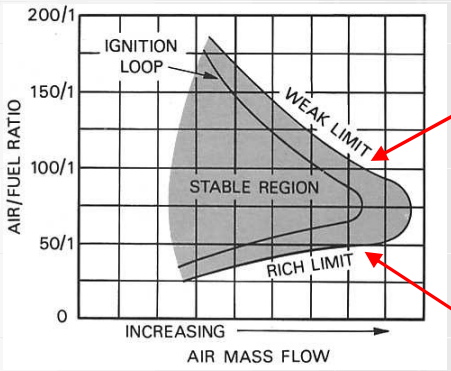


Statecznik stożkowy

mieszanka benzynowo-powietrzna

139

Wpływ składu mieszanki na zakres stabilności



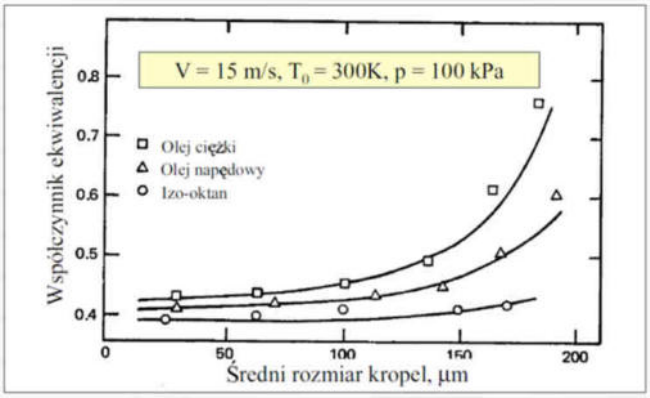
Dolna granica zapłonu

Górna granica zapłonu

Zakres stosunku powietrze/paliwo między górną i dolną granicą zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości powietrza, a gdy masowe natężenie przepływu powietrza przekracza wartość graniczną, następuje gaszenie płomienia. Zakres roboczy określony przez pętlę stabilności musi oczywiście obejmować stosunek powietrze/paliwo i masowy przepływ w komorze spalania.

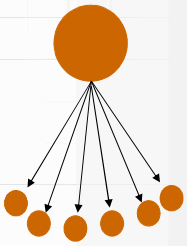
140

Wpływ rozdrobnienia paliwa na dolny zakres stabilności



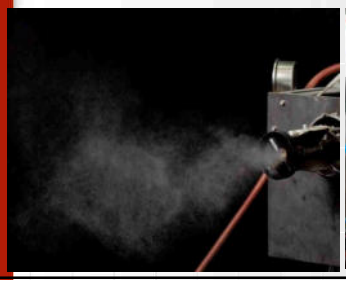
141

Rozpylanie paliw ciekłych



Rozpylanie jest procesem przekształcenia ciągłej strugi cieczy w zbiór drobnych kropel.

Proces ten zachodzi poprzez rozpad strugi cieczy na mniejsze strugi (rozpad pierwotny), które przekształcają się następnie w krople (wtórny rozkład).



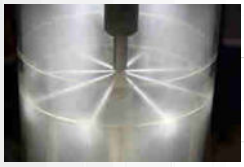
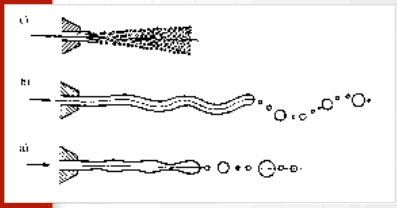


Foto: http://wtryskiwacz.com.pl

<- Foto: Badania własne

142

Rozpylanie strugi



Pierwotny rozpad strugi,
(prędkość wypływu rośnie od a do c)

wtórny rozpad kropel

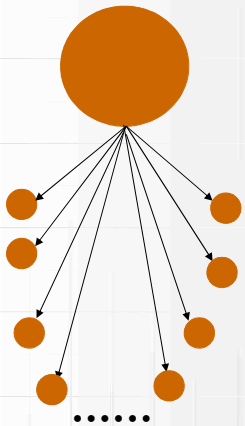
Naruszenie równowagi sił bezwładności i napięcia powierzchniowego powoduje symetryczne zaburzenia strugi (a) prowadzące do jej rozpadu na krople o średnicy $d_0 \cong 1{,}89L$.

Nasilone oddziaływanie gazu skutkuje zmniejszeniem rozmiarów kropli (b).

Atomizację cieczy obserwuje się dla wielkich prędkości wypływu strugi, kiedy liczby Re i We osiągają duże wartości – struga rozpada się już u wylotu dyszy, a krople są dużo mniejsze od średnicy strugi.

Rozpylanie paliw ciekłych

Wpływ rozpylania paliwa na proces spalania



Założenie:

1 kropla paliwa ma objętość 1cm^3, promień 0,62cm, powierzchnia zewnętrzna P=4,83 cm^2.

Po rozbiciu jej na milion jednakowych mniejszych kropel suma powierzchni zew. wyniesie
$\sum P$ = 483 cm^2 (przy r ≈0,006cm)

czyli ulegnie 100-krotnemu zwiększeniu.

Ma to istotne znaczenie dla procesu spalania – szybkości odparowania i spalania kropli, jakości mieszania z utleniaczem, aerodynamiki płomienia.

144

Czas spalania pojedynczej kropli paliwa

Czas spalania kropli paliwa t_s:

$$t_s = kd_o^2$$

d_o – średnica początkowa kropli

k – współczynnik

Czas spalania kropli paliwa silnie zależy od średnicy początkowej spalanej kropli, z czym związane jest m.in. nagrzewanie kropli i odparowanie.

145

Fazy spalania paliw ciekłych

Wyróżnić można dwie fazy spalania paliw ciekłych:

a) faza parowania paliwa

b) faza spalania par paliwa (spalanie gazu)

Na całkowity czas spalania kropli wpływa czas wymagany dla przebiegu obu tych faz.
Na szybkość parowania, oprócz wielkości kropli, wpływać będzie także temperatura otoczenia (w płomieniu), natomiast na czas spalania par wpływać będzie m.in. dostępność utleniacza.

146

Dominujące czynniki w spalaniu paliw ciekłych

Czynniki dominujące:

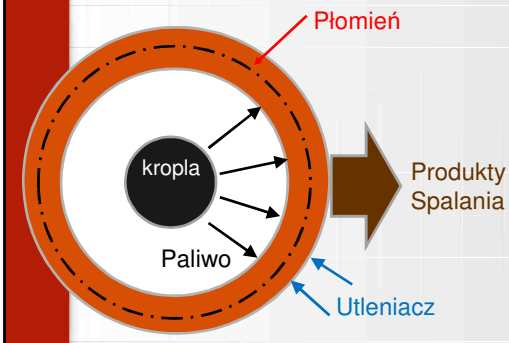
- parowanie cieczy,

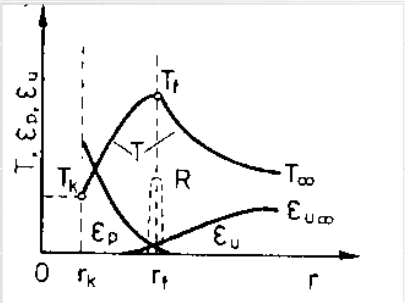
- mieszanie par z utleniaczem,

- kinetyka chemiczna spalania.

147

Spalanie pojedynczej kropli paliwa



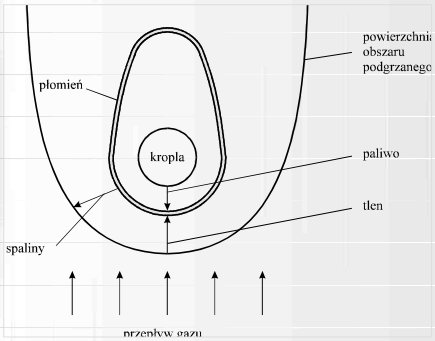


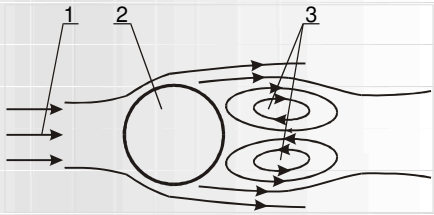
r_k – promień kropli, r_f – promień czoła płomienia

Model dyfuzyjnego spalania kropli paliwa:
a) geometria płomienia,
b) rozkłady temperatury (T) oraz stężenia paliwa (ε_p) i tlenu (ε_u)

148

Wpływ konwekcji na spalanie kropli paliwa





a) wpływ konwekcji swobodnej,

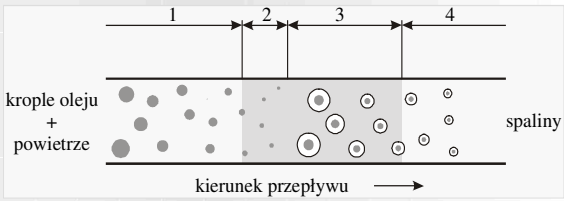
b) wpływ konwekcji wymuszonej (1 – przepływ, 2 – kropla, 3 – strefa recyrkulacji)

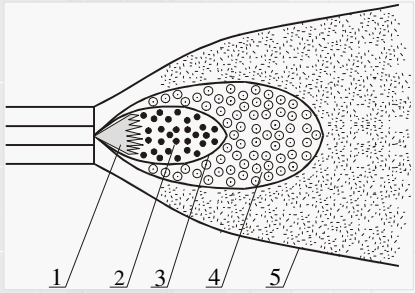
149

Struktura płomienia

model jednowymiarowy

1 – strefa parowania,
2 – strefa homogenicznego spalania, 3- strefa heterogenicznego spalania,
4 – strefa dopalania





1 – struga, 2 – krople,
3- spalanie kropel,
4 – dopalanie,
5 – granice płomienia

150

Mechanizmy rozpylania strugi cieczy

Istota rozpylania cieczy w strudze polega na pokonaniu napięcia powierzchniowego cieczy przez siły zewnętrzne lub wewnętrzne:

– naprężenia styczne na powierzchni strugi, wywołane różnicą prędkości między cieczą a powietrzem, które destabilizuje strugę, wywołując jej rozkład,

– siły odśrodkowe ruchu wirowego strugi, siły wywołane wzrostem ciśnienia w kropli na skutek parowania w jej wnętrzu,

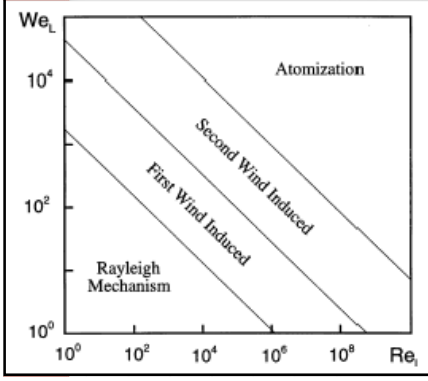
– zewnętrzne siły mechaniczne, elektrostatyczne i ultradźwięków.

151

Mechanizmy rozpylania strugi cieczy

Decydującą rolę w rozpyleniu odgrywają siły: bezwładności, lepkości i napięcia powierzchniowego.

Relacje tych sił można wyrazić za pomocą dwóch liczb bezwymiarowych, charakterystycznych dla procesu rozpylania strugi cieczy – **Reynoldsa i Webera**.



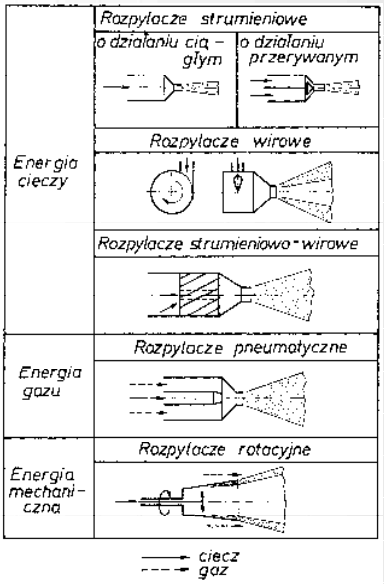
$$Re = (UL)/\nu$$

$$We = (U^2L)/\sigma$$

Wymiar liniowy L oznacza odpowiednio średnicę wylotu lub rozmiar kropli (d_0).

σ - współczynnik napięcia powierzchniowego cieczy

Mechanizmy rozpylania strugi cieczy



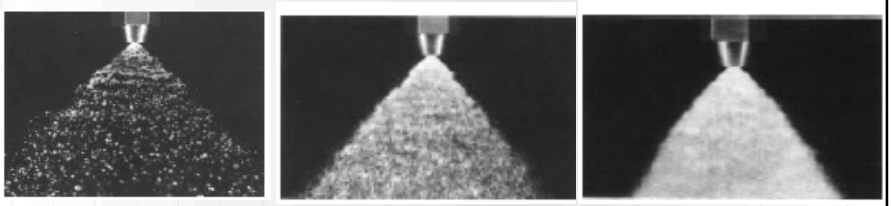
Rodzaje energii wykorzystywanych do rozpylanie oleju jako podstawa do klasyfikacji rozpylaczy

153

Rozpylanie strugi

Wpływ ciśnienia na jakość rozpylenia oleju

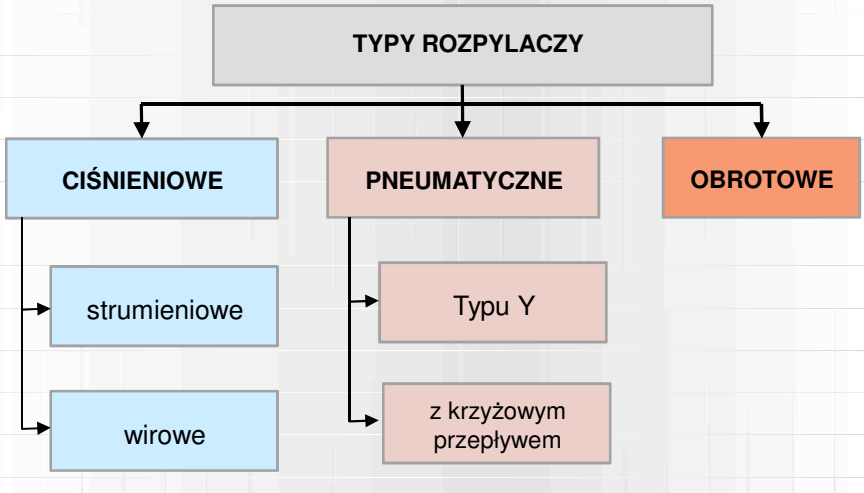
Wraz ze wzrostem ciśnienia rozpylania widać wzrost rozdrobnienia kropel objawiające się wzrostem powierzchni kropel i tworzenie strugi w postaci „mgły”.



5 bar 10 bar 15 bar

154

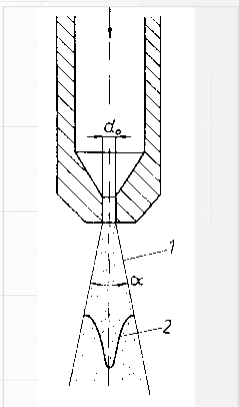
Systemy rozpylania oleju



155

Ciśnieniowy rozpylacz strumieniowy

Strumieniowy rozpylacz przelotowy



$d_o > 0{,}5$ mm

$\Delta p = 0{,}3\text{-}1(5)$ MPa

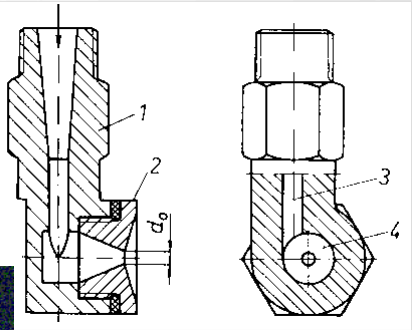
$\alpha = 5\text{-}15^o$

Prosta konstrukcja

Niska jakość rozpylania

156

Ciśnieniowy rozpylacz wirowy



Rozpylacz wirowy

d_o = 2-6 mm

Δp = 0,6-1,0 MPa

α = 45-90^o

Prosta budowa

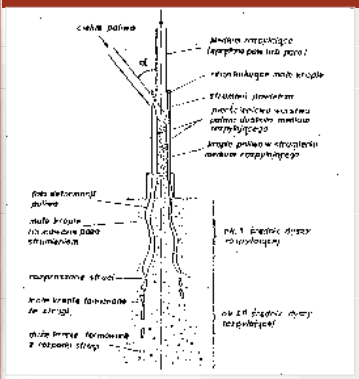
Pewność działania

Dobra jakość rozpylania

Małe zużycie mocy

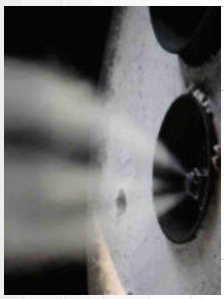
Kształtowanie wypełnienia strugi

Rozpylacz pneumatyczny



Zużycie czynnika roboczego
δ =0,06-0,1 kg/kg

Rozpylacze tego typu wykorzystywane są często w układach palnikowych dla paliw o zwiększonej lepkości (np. mazut, biopaliwa).



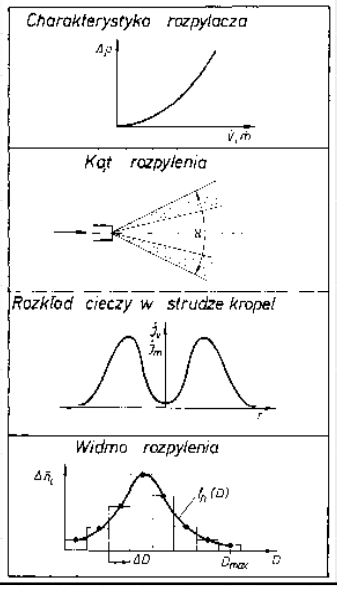
Parametry rozpylania paliwa

Parametry rozpylania:

- wydajność, kg/s
- kąt rozpylania, °
- rozłożenie kropel (po promieniu),
- jakość rozpylania.

159

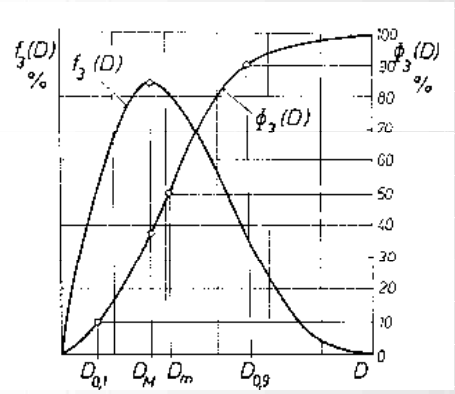
Parametry rozpylania paliwa



Wybrane parametry rozpylaczy

160

Rozkład kropel w strudze



Krzywe rozkładu kropel

Średnia średnica kropli;

- średni rozmiar kropel: SRK = $[(\Sigma nD^3/\Sigma nD)]^{0,5}$,
- średnica Sautera: SMD = $\Sigma\, nD^3/\Sigma\, nD^2$.

161

Regulacja wydatku

W ciśnieniowych rozpylaczach strumieniowych regulacja wydatku oleju przez zmianę ciśnienia oleju jest możliwa tylko w wąskim zakresie bez ujemnego wpływu na jakość rozpylania.

$$m = \mu A(2\rho\Delta p)^{0,5},\ kg/s$$

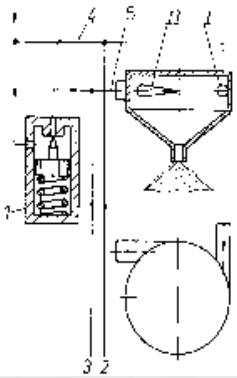
A - pole powierzchni wypływu, μ - współczynnik wypływu, ρ - gęstość paliwa

W celu zapewnienia szerszego zakresu regulacji wydatku stosuje się ciśnieniowe rozpylacze regulowane, które dzielą się na:

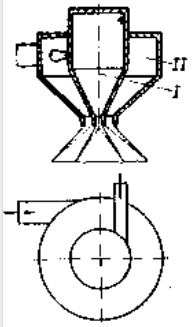
- rozpylacze dwustopniowe,
- rozpylacze upustowe,
- rozpylacze z regulacją powierzchni otworów wylotowych.

162

Dwustopniowa regulacja wydatku



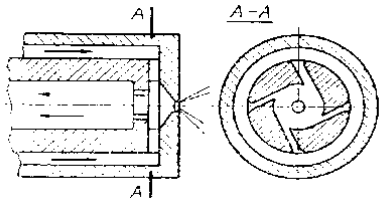
Schemat jednokomorowego rozpylacza dwuzakresowego: 1 – zawór, 2, 3 – odprowadzenie



Rozpylacz dwudyszowy

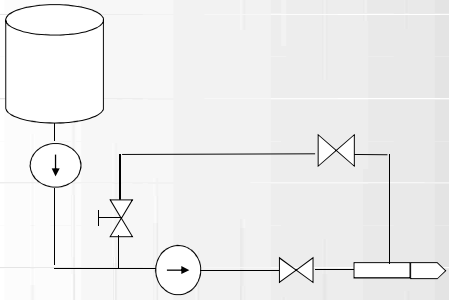
I, II – dysza

Upustowa regulacja wydatku paliwa



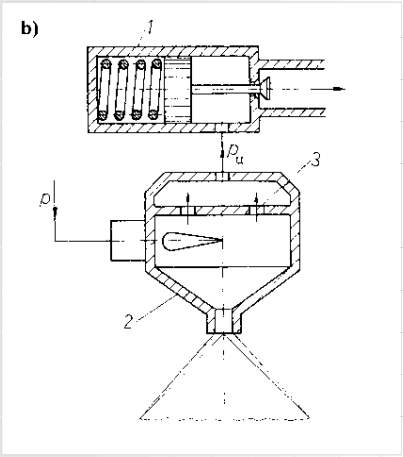
Rozpylacz

Zbiornik oleju



Rozpylacz upustowy z zaworem

1 – zawór,
2 – komora wirowa,
3 – otwory upustowe



165

Wtrysk paliwa do komór spalania w silnikach

W przypadku dozowania paliwa do komór spalania w silnikach wtryskuje się precyzyjnie niewielkie dawki paliwa w określonym czasie. Wykorzystuje się do tego specjalne wtryskiwacze wykonane przy wykorzystaniu najnowocześniejszej technologii drążenia otworów laserem. Umieszczona w cylindrze silnika końcówka wtryskiwacza musi wytrzymać bardzo wysokie temperatury, dochodzące do kilkuset stopni Celsjusza. Kiedy dojdzie do zużycia wtryskiwacza, jakość rozpylenia paliwa spada.

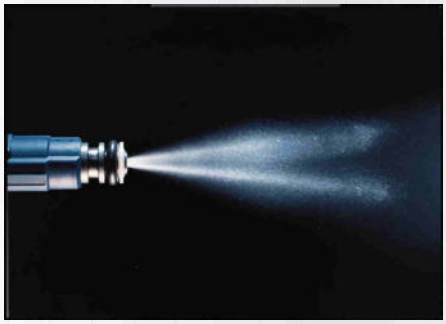
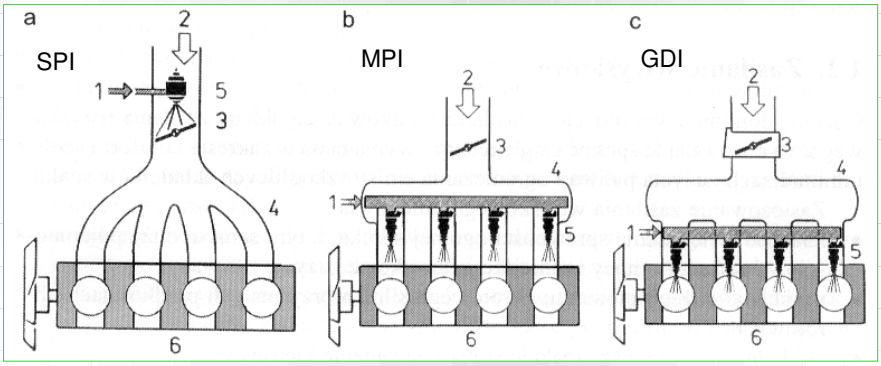


Foto: https://www.auto-swiat.pl

166

Układy wtryskowe w silnikach ZI

- jednopunktowy (do kolektora) SPI - *single point injection*.
- wielopunktowy (do przewodu dolotowego) MPI - *multipoint injection*,
- bezpośredniego wtrysku DI - *direct injection*.



a) Jednopunktowy (SPI), b) wielopunktowy (MPI), c) wielopunktowy bezpośredni (GDI); 1- doprowadzenie paliwa, 2- zasysane powietrze, 3- przepustnica, 4- układ dolotowy, 5- wtryskiwacz paliwa, 6- silnik

Kedzia, R., Okoński, A., „Układy paliwowe systemów wtryskowych silników z zapłonem iskrowym", Poradnik Serwisowy Nr 1/2002, Instalator Polski, Warszawa 2002

167

Wtrysk pośredni paliwa w silnikach ZI

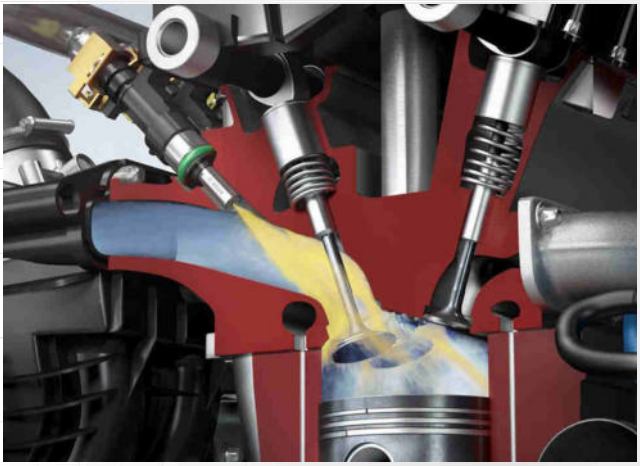


Foto: https://www.auto-swiat.pl

Przykład wtrysku wielopunktowego (MPI). Wtryskiwacz znajdujący się w kanale dolotowym silnika spalinowego podaje paliwo na zawór ssący.

168

Wtrysk bezpośredni paliwa w silnikach ZI

Foto: https://www.auto-swiat.pl

Bezpośredni wtrysk paliwa (DI). Wtryskiwacz podaje paliwo bezpośrednio do komory spalania (cylindra). Wtryskiwane paliwo znacząco obniża temperaturę w cylindrze przy dużych obciążeniach silnika, dzięki temu można podnieść stopień sprężania, szczególnie w silnikach doładowanych.

169

Wtrysk bezpośredni paliwa w silnikach ZI

Procesu napełniania w silniku FSI (Fuel Stratified Injection)

Skład jednorodny – mieszanka homogeniczna

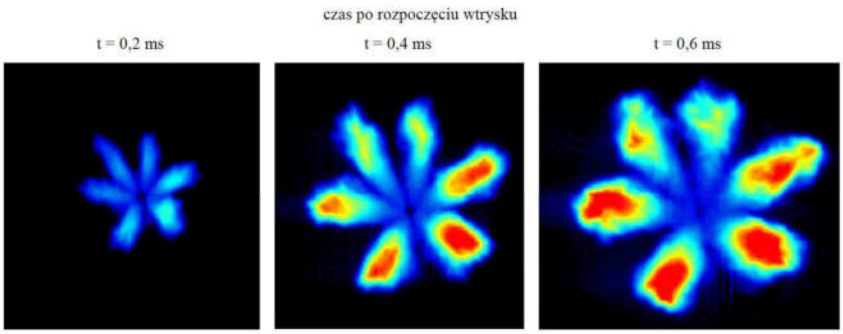
Skład uwarstwiony

Źródło: materiały Audi AG

170

Wtrysk bezpośredni paliwa w silnikach ZI

Propagacja strug paliwa dla wtryskiwacza elektromagnetycznego



Rys. 11. Rozpylenie paliwa z wielootworkowego wtryskiwacza elektromagnetycznego (widok od frontu) (badania własne: P_{wtr} = 20 MPa, t_{wtr} = 0.3 ms, P_{pow} = 1,5 MPa)

Skowron M., Pielecha I., Logistyka 3/2015

171

Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

Wymagania stawiane wtryskiwaczom paliwa:

1. Zdolność do dobrego rozdrobnienia paliwa w szerokim zakresie wydatków paliwa
2. Zdolność do szybkiej odpowiedzi na zmianę wydatku paliwa
3. Stabilny proces rozpylania
4. Możliwość najniższe ciśnienie zasilania
5. Możliwość łatwego przeskalowania konstrukcyjnego
6. Niskie koszty, waga, a także łatwość serwisu i utrzymania
7. Odporność na uszkodzenia transportowe i podczas instalacji
8. Odporność na zanieczyszczenia i tworzenie się nagaru
9. Równomierność osiowego i obwodowego rozkładu kropel.

172

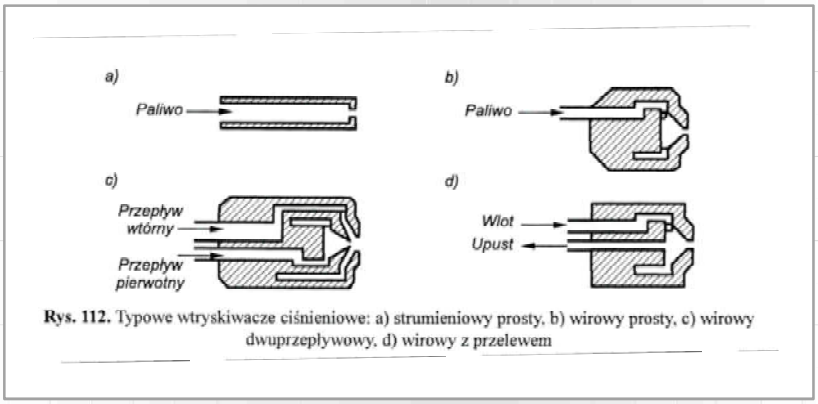
Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

Główne typy stosowanych wtryskiwaczy:

1. Wtryskiwacze ciśnieniowe
2. Wtryskiwacze ze wspomaganiem powietrznym
3. Wtryskiwacze z odparowaniem paliwa
4. Wtryskiwacze obrotowe

Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

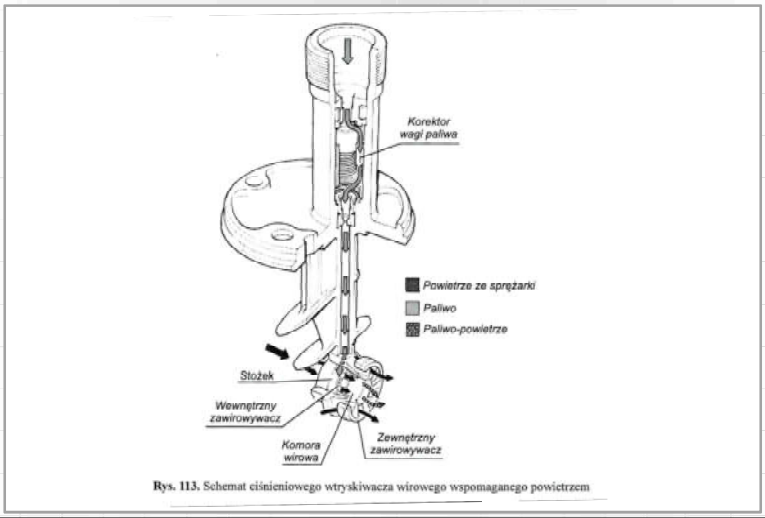
1. Wtryskiwacze ciśnieniowe



Rys. 112. Typowe wtryskiwacze ciśnieniowe: a) strumieniowy prosty, b) wirowy prosty, c) wirowy dwuprzepływowy, d) wirowy z przelewem

Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

2. Wtryskiwacze ze wspomaganiem powietrznym

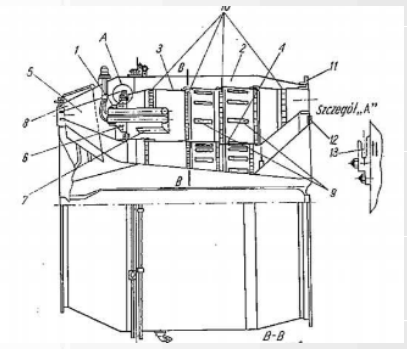


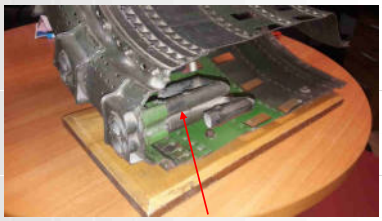
Rys. 113. Schemat ciśnieniowego wtryskiwacza wirowego wspomaganego powietrzem

175

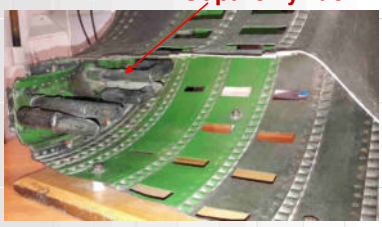
Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

3. Wtryskiwacze z odparowaniem paliwa





Odparowywacz

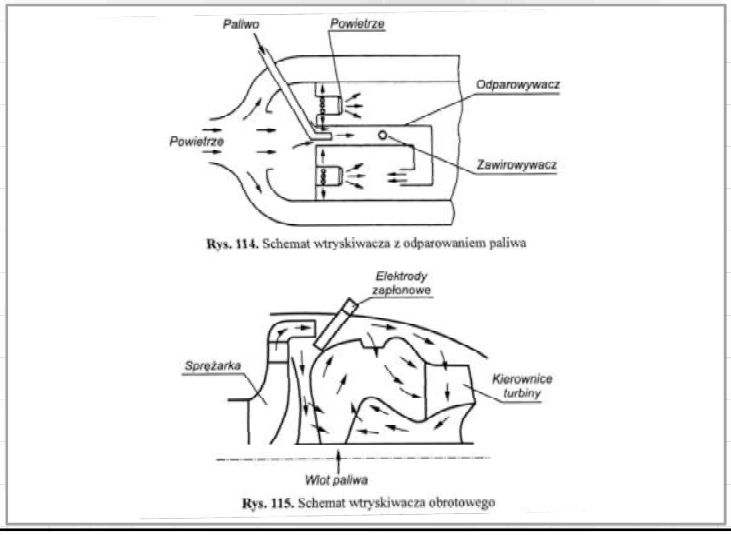


1- pierścień wlotowy z parownicami, 2- osłona komorowa, 3- zewnętrzna rura żarowa, 4- wewnętrzna rura żarowa. Powietrze wychodzące ze sprężarki w kadłubie wlotowym zostaje rozdzielone na dwa strumienie: pierwotny i wtórny. Powietrze pierwotne doprowadzane jest do wnętrza rury żarowej przez wewnętrzny stożek kadłuba wlotowego 5, a następnie przez otwory w pierścieniu wlotowym 6 oraz częściowo przez parownice 7. Powietrze pierwotne bierze udział w spalaniu paliwa w strefie spalania, a powietrze do parownic zapobiega koksowaniu paliwa w parownicach

176

Wtrysk paliwa w silnikach turbinowych

4. Wtryskiwacze obrotowe



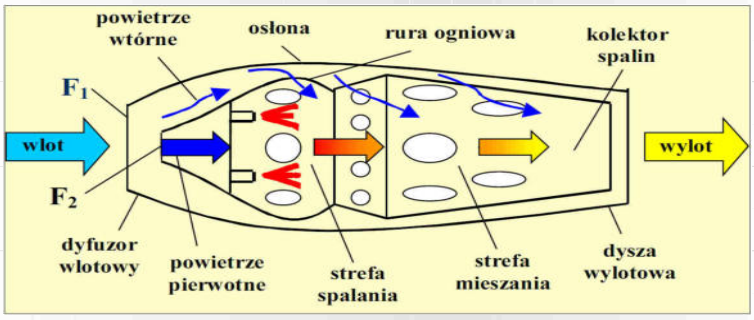
Rys. 114. Schemat wtryskiwacza z odparowaniem paliwa

Rys. 115. Schemat wtryskiwacza obrotowego

177

Zasada pracy komory spalania w turbinie gazowej

Komora spalania to miejsce, w którym przebiegają wszystkie procesy niezbędne do właściwego przygotowania i spalenia paliwa w celu uzyskania z niego maksimum energii i przekształceniu jej części w ciąg.

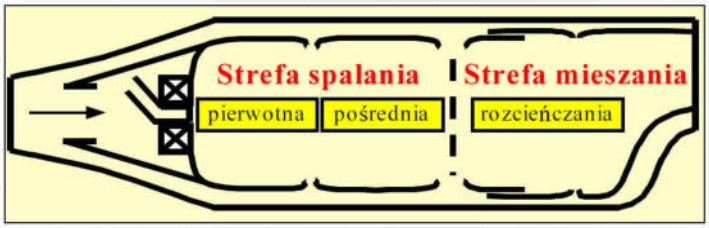


Zasada pracy komory spalania polega na dostarczeniu do sprężonego powietrza i rozdrobnionego paliwa, które po odparowaniu zostaje spalone. Powstałe spaliny zostają ochłodzone do temperatury wymaganej dla bezpiecznej pracy turbiny.

178

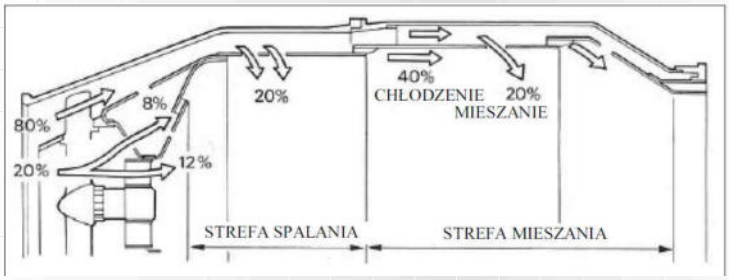
Strefy w komorze spalania turbiny gazowej

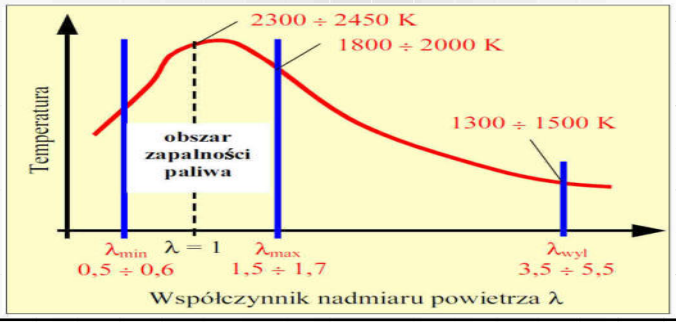
1. **Strefa spalania**
   a) Pierwotna (stechiometryczna, bogata, uboga) – ma za zadanie zapewnić stabilne i intensywne spalanie.
   b) Pośrednia (zalecana temperatura spalania 1800K) – w której przebiega rekombinacja rodników oraz dopalenie półproduktów spalania, takich jak: CO, sadzy, CnHm.
2. **Strefa mieszania** (rozcieńczania) – ma za zadanie schłodzenie spalin do wymaganej dopuszczalnej temperatury przed turbiną



179

Rozpływ powietrza w komorze spalania

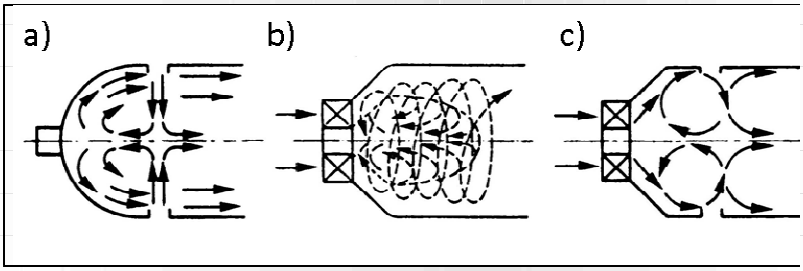




180

Organizacja mieszania powietrza w komorze spalania

Sposoby organizacji przepływu powietrza w obszarze spalania zmierzają do wywołania recyrkulacji spalin, powstania turbulencji o określonej skali i intensywności aby zapewnić całkowite i zupełne spalanie.



Linie prądu w obszarze spalania formowane pod wpływem:
a) strumieni przeciwprądowych , b) zawirowania przepływu,
c) obydwu czynników

181

Wymagania dla komór spalania

- możliwie największe wykorzystanie ciepła zawartego w paliwie
- wysoka statyczność pracy w dowolnych warunkach pracy silnika (prędkość obrotowa, prędkość i wysokość lotu)
- łatwy i niezawodny rozruch (szczególnie podczas rozruchu w powietrzu $H \leq 6 \div 10$ km)
- minimalne straty przepływu w komorze spalania
- mała objętość (małe wymiary) komory spalania
- małe wymiary i masa własna ($1/d \geq 2 \div 4$, obciążenie cieplne komory spalania $q = 0{,}8 \div 1{,}4$ kW/m^3
- optymalny rozkład temperatur na wylocie
- duża trwałość i niezawodność eksploatacji
- niska emisja zanieczyszczeń

182

Wybrane parametry komory spalania

- temperatura płomienia 2200 ÷ 2400 K
- temperatura przed wlotem do turbiny 1100 ÷ 1650 K
- czas trwania procesu spalania 0,01 ÷ 0,02 sek.
- współczynnik nadmiaru powietrza λ = 0,5 ÷ 5,5
- zużycie powietrza do ≈2700 t/h
- zużycie paliwa do ≈ 9 t/h

183

Podstawowe parametry napędów lotniczych

Ciąg silnika K (siła pchająca strumień gazów opuszczających dysze silnika odrzutowego i wykorzystywana do poruszania samolotu czy śmigłowca) równy iloczynowi masowego natężenia przepływu gazów opuszczających silnik przez dyszę i ich efektywnej prędkości wypływu:

$$K = \dot{m} \cdot V_H$$

Rozróżnia się ciąg wewnętrzny K i ciąg efektywny silnika K_e

$$K_e = K - F_{zew}$$

gdzie:
K – ciąg wewnętrzny silnika (czyli z pominięciem wpływu oporu zewnętrznego)
K_e – ciąg efektywny (część ciągu wewn. wykorzystana do pokonania sił oporu)
F_{zew} – wypadkowa sił oddziaływania strumienia na zewnętrzną pow. gondoli
m – natężenie przepływu gazów przez silnik, kg/s

Związek pomiędzy mocą silnika **P** i ciągiem **K**:

$$K = \frac{P}{V_H}$$

gdzie:
P - moc, kW
V_H - prędkość lotu, m/s

184

Podstawowe parametry jednostkowe silników turbinowych

Jednostkowe zużycie paliwa C_j wyrażone jako stosunek masy paliwa zużywanego przez silnik w jednostce czasu do jego ciągu lub mocy:

$$C_j = \frac{C_h}{K} \quad \text{lub} \quad C_j = \frac{C_h}{P}$$

gdzie:
C_j - jednostkowe zużycie paliwa, kg/Nh, kg/kWh
C_h - masa (zużycie) paliwa w jednostce czasu, kg/h

Ciąg jednostkowy k_j wyrażony jako stosunek ciągu silnika do masowego natężenia przepływu powietrza przez silnik:

$$k_j = \frac{K}{\dot{m}}$$

m - natężenie przepływu powietrza, kg/s

185

Podstawowe parametry jednostkowe silników turbinowych

Moc jednostkowa **p_j** wyrażona jako stosunek mocy do masowego natężenia przepływu powietrza przez silnik:

$$p_j = \frac{P}{\dot{m}}$$

masa jednostkowa **m_j** określona jako stosunek masy konstrukcji silnik bez paliwa i oleju do jego ciągu lub mocy (ukazuje jaka masa konstrukcji silnika jest niezbędna do wytworzenia jednostki ciągu lub mocy):

$$m_j = \frac{M_{silnika}}{K} \quad \text{lub} \quad m_j = \frac{M_{silnika}}{P}$$

gdzie:
$M_{silnika}$ - masa konstrukcji silnika, kg

186

Podstawowe parametry napędów lotniczych

Ilość wydzielonego ciepła **Q**

$$Q = \frac{Q_d \cdot C_s}{\xi_{KS}}$$

gdzie:

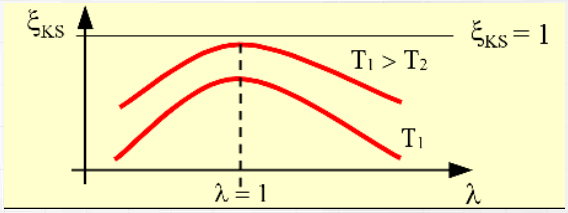
Q - rzeczywista ilość ciepła wydzielona w procesie spalania, kW

Q_d - wartość opałowa paliwa, kJ/kg

C_s - strumień paliwa, kg/s

ξ_{KS} - współczynnik wydzielania ciepła

- ξ_{KS} = 0,95 ÷ 0,98 dla głównych komór spalania
- ξ_{KS} = 0,95 ÷ 0,98 dla komór spalania dopalaczy i silników strumieniowych

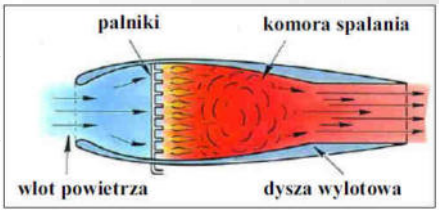


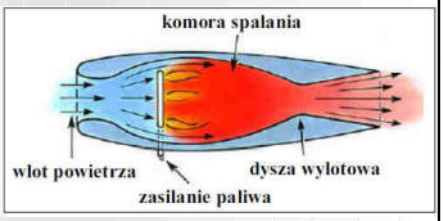
187

Elementy komory spalania

Rura ogniowa – jest podstawową objętością roboczą komory spalania przeznaczoną do przygotowania mieszanki palnej, jej wymieszania i spalania (prędkości przepływu V_3 = 30 ÷ 45 m/s) oraz wytworzenia składu spalin o określonej temperaturze. Dzieli się na dwie strefy:

- **strefę przygotowania mieszanki i spalania,**
- **strefę mieszania i chłodzenia.**



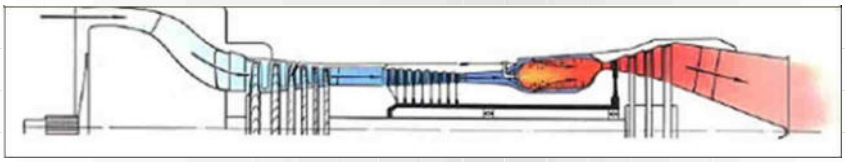


188

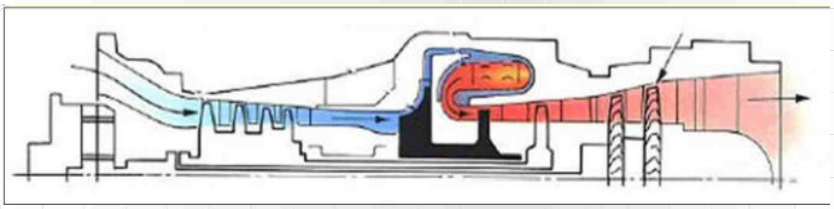
Podział komór spalania

ze względu na kierunek przepływu powietrza:

- komory o przepływie prostym,



- komory o przepływie zwrotnym (powietrze chłodzi komorę i podgrzewa się, przez co skraca czas spalania, ale powoduje wzrost oporów przepływu - układ stosowany tylko w małych silnikach).

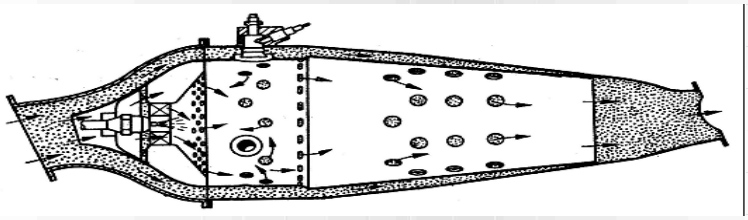


189

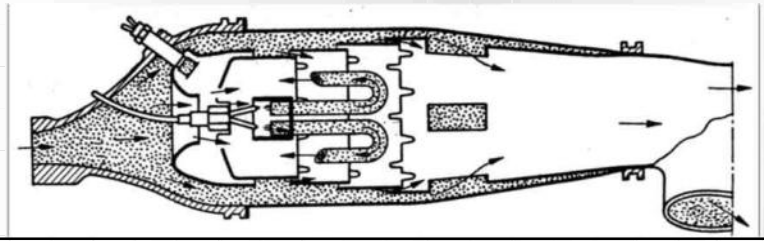
Podział komór spalania

Ze względu na zasilanie paliwem:

- z bezpośrednim rozpylaniem paliwa,

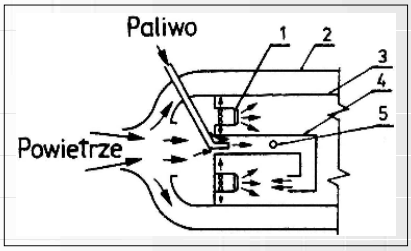


- ze wstępnym odparowaniem mieszanki.



190

Podział komór spalania



1. Doprowadzenie powietrza
2. Obudowa komory spalania
3. Rura żarowa
4. Parownica
5. Turbulizator

Podział ze względu na charakter pracy:

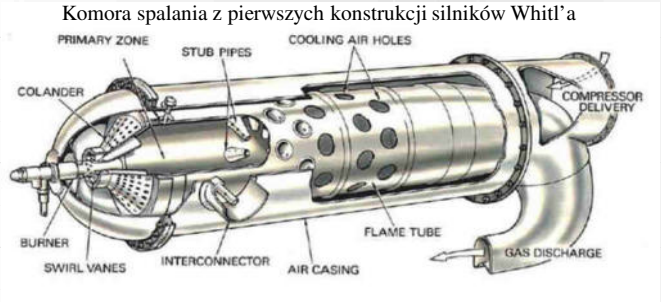
- główne (mieszczące się zawsze między sprężarką a turbiną lub między wlotem a dyszą wylotową w silniku strumieniowym),
- dodatkowe (mieszczące się poza turbiną - dopalacze i silniki dwuprzepływowe).

191

Rodzaje komór spalania

Komora dzbanowa indywidualna

Komora spalania z pierwszych konstrukcji silników Whitl'a



Zalety

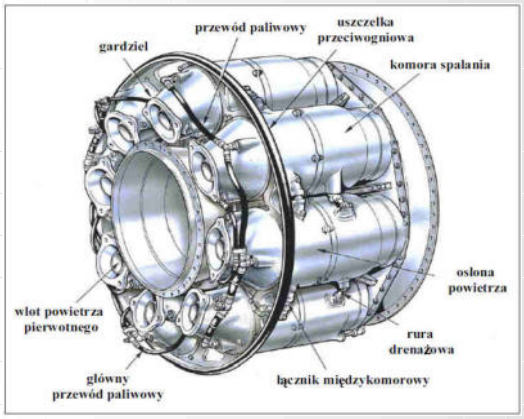
- Łatwość eksperymentalnego sprawdzenia procesu wewnątrzkomorowego
- Możliwość wymiany pojedynczej rury komory spalania

Wady

- Duże opory przepływu
- Duża nierównomierność obwodowa pól temperatur na wyjściu z KS

192

Rodzaje komór spalania



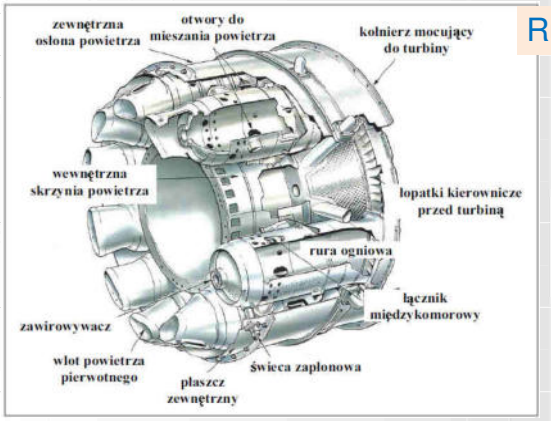
Komora rurowa

Zalety
- prosta konstrukcja
- dobra stabilizacja płomienia
- łatwa kontrola procesu i wymiana
- uszkodzonych sekcji
- indywidualny wypływ spalin

Wady
- duże wymiary promieniowe i straty (opory) przepływu
- nierównomierny rozkład prędkości i temperatury
- konieczność stosowania zbiorczego kolektora spalin
- trudności z włączeniem osłony w szkielet nośny silnika

193

Rodzaje komór spalania



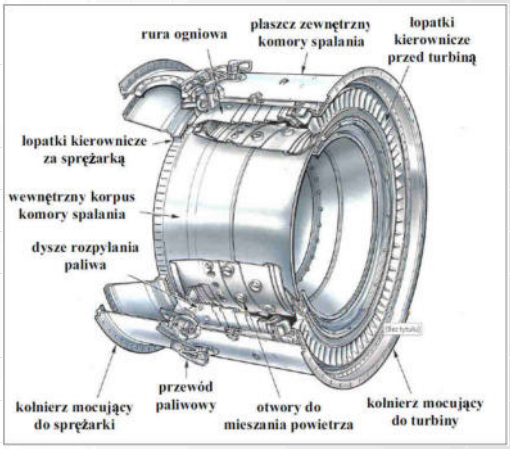
Rurowo - pierścieniowa

Wady
- konieczność wyrównywania profilu prędkości i temperatury na wylocie z komory

Zalety
- mniejsza średnica silnika
- dobra stabilizacja płomienia
- możliwość wykorzystania ciągłej konstrukcji płaszcza zewnętrznego jako struktury nośnej silnika

194

Rodzaje komór spalania



Komora pierścieniowa

Zalety:

- jednorodny rozkład spalin i jej temperatury na wylocie
- lekka, prosta i zwarta konstrukcja
- Mała liczba elementów oraz niewielkie straty cieplne i przepływu
- Mała średnica (10% mniejsze)

Wady:

- trudności z utrzymaniem stabilnego płomienia
- duża liczba wtryskiwaczy (powyżej 20)
- stosunkowo trudny montaż i demontaż komory

195

Specjalne komory spalania

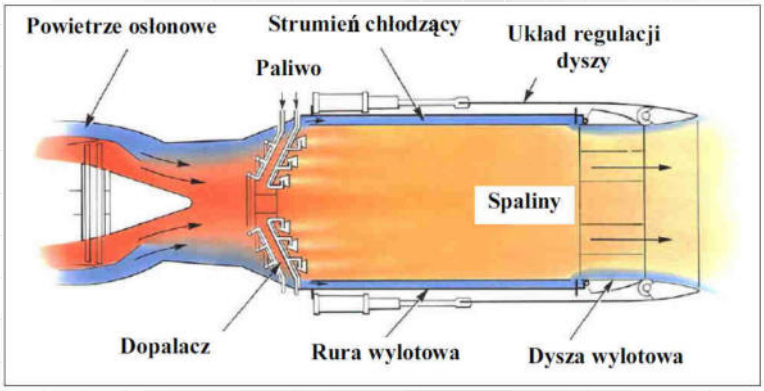
Komory spalania specjalne to modyfikacje trzech podstawowych typów komór spalania, które mogą polegać na:

- zastosowanie obiegu zwrotnego przepływu powietrza (komory pierścieniowe)
- odśrodkowe zasilanie paliwem (komory pierścieniowe)
- wytwarzanie mieszanki palnej z zastosowaniem parownic (komory pierścieniowe)
- wykonanie spiralnej komory spalania skracającej długoś silnika (komory rurowe)
- budowa komór wynośnych z ukierunkowanym wypływem spalin

196

Dopalacze

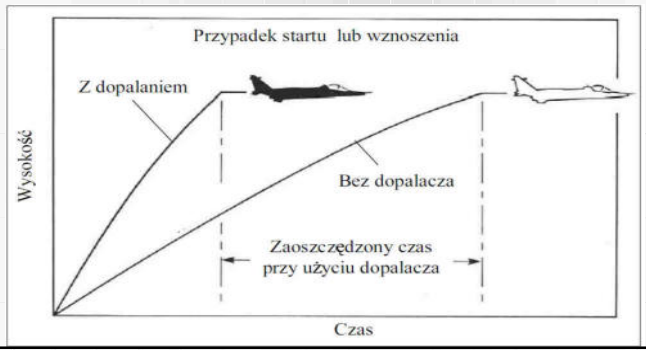
Dopalanie – jest najbardziej rozpowszechnioną metodą krótkotrwałego zwiększenia ciągu turbinowego silnika odrzutowego i polega na spaleniu dodatkowej ilości paliwa w specjalnej komorze (dopalaczu) umieszczonej za turbiną silnika w celu wzrostu entalpii strumienia i energii kinetycznej spalin.



197

Cel stosowania dopalaczy

- skrócenie rozbiegu samolotu podczas startu lub jego utrzymanie przy niekorzystnym warunkach atmosferycznych
- rozpędzenie samolotu do prędkości maksymalnej (przekroczenie prędkości dźwięku)
- zwiększenie prędkości wznoszenia w celu szybkiego osiągnięcia odpowiedniego pułapu lotu
- polepszenie ekonomiczności silników na zakresach dużych prędkości lotu powyżej $Ma_H > 2,5$



198

Warunki panujące w komorze dopalającej (dopalaczu)

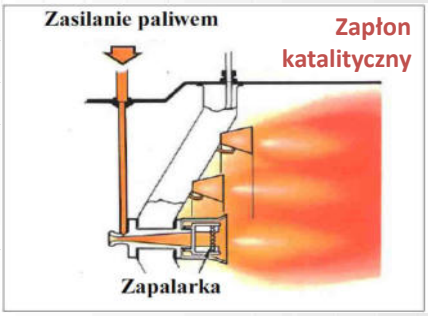
- stosunkowo mały współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda \leq 1{,}1 \div 1{,}8$
- wysoka temperatura spalin wlotowych $T \geq 800 \div 1000$K (łatwiejszy zapłon i propagacja płomienia, możliwa gorsza jakość rozpylania paliwa)
- znacznie większa średnia prędkość strumienia wlotowego spalin (dwa razy większa od prędkości wlotowej do głównej komory spalania)
- mniejsze stężenie tlenu w mieszance palnej oraz zanieczyszczenie jej produktami spalania z głównej komory spalania
- brak elementów ruchomych w komorze dopalacza

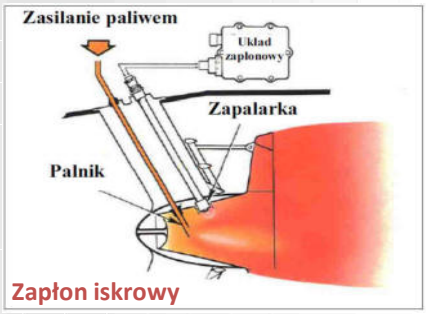
Wady stosowania dopalaczy

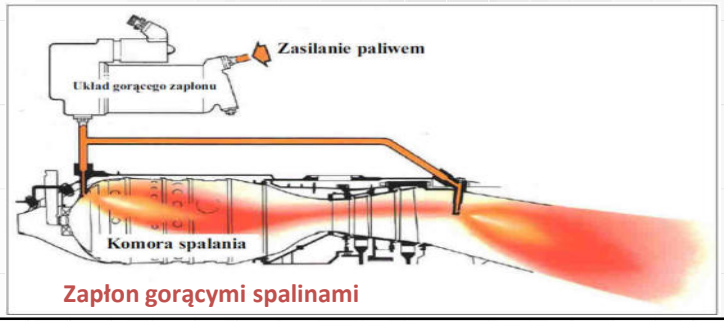
- wzrost wymiarów osiowych (a często i promieniowych) silnika
- wzrost masy silnika (10 ÷ 20%)
- spadek ekonomiczności silnika w warunkach statycznych i na małych prędkościach lotu
- obniżenie ciągu silnika pracującego bez dopalania (1,5 ÷ 2,0%)

199

Zapłon paliwa w dopalaczach:







200

Wymiana ciepła w komorze spalania

1. Najbardziej narażonym na oddziaływanie gorących spalin w komorze spalania jest płomienica (rura żarowa) wykonana ze stopów na osnowie niklu, których temperatura pracy nie przekracza 1100 K.
2. We współczesnych turbinach gazowych (lotniczych i energetycznych) zwiększa się stopień sprężania (p_{wlot}/p_{wylot} spręarki), który sięga obecnie 30 i prowadzi do wzrostu sprawności turbiny (sięga 0,4%). Jednak ze wzrostem stopnia sprężania rośnie obciążenie objętościowe komory spalania i zwiększa się strumień ciepła przejmowanego przez płomienicę.
3. Temperatura spalin przekracza 2000 K, dlatego płomienica musi być chłodzona.

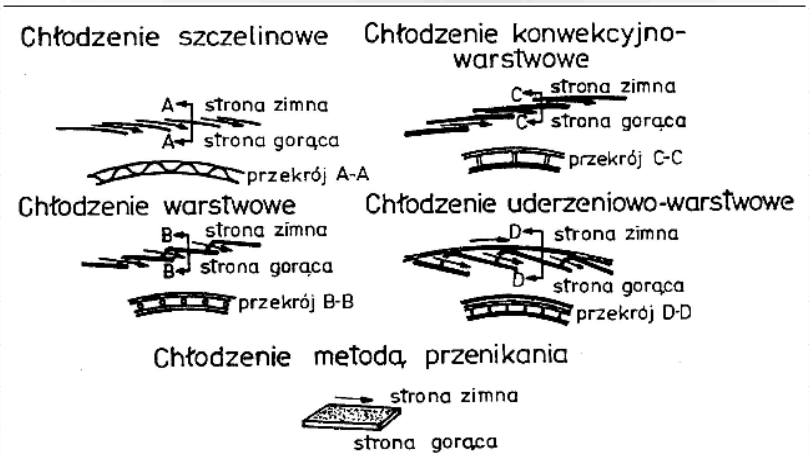
201

Sposoby chłodzenia płomienicy

1. **Warstwowe** – polega na przenikaniu powietrza na stronę wewnętrzną płomienicy przez rząd otworków o małej średnicy. Strugi powietrza tworzą kurtynę oddzielającą wewnętrzną stronę płomienicy od gorących spalin.
2. **Konwekcyjno-warstwowe** – polega na przedłużeniu kanalików doprowadzających powietrze do wnętrza płomienicy. Dzięki temu poprawia się efektywność chłodzenia płomienicy, ale zwiększa się jej ciężar.
3. **Transpiracyjne** (z porowatą ścianą) – polega na przenikaniu powietrza przez porowatą ścianę płomienicy i tworząc kurtynę powietrzna od gorących spalin.

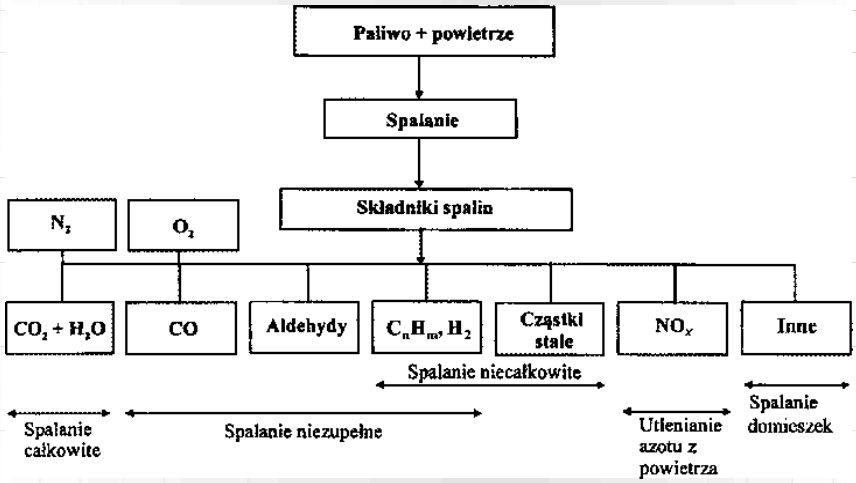
202

Techniki chłodzenia ścianek komory spalania



203

Zanieczyszczenia emitowane podczas spalania



204

Zanieczyszczenia emitowane z napędów lotniczych

Zanieczyszczenia typowe dla spalania płynnych węglowodorów:

- Tlenek węgla (CO),
- Węglowodory (C_nH_m),
- Tlenki azotu (NO_x),
- Dwutlenek siarki (SO_2),
- Cząstki stałe (sadza).

205

Zanieczyszczenia z napędów lotniczych a środowisko

Zagrożenia dla troposfery: **(do 10km)**

- Kwaśne deszcze (SO_2 i NO_x)
- Smog fotochemiczny (NO_x i C_nH_m)
- Zwiększenie zapylenia powietrza (sadza)

Zagrożenia dla stratosfery: **(10-50km)**

- Efekt cieplarniany (CO_2 i C_nH_m)
- Powiększenie dziury ozonowej (NO_x)
- Rozpraszanie promieniowania słonecznego (SO_2)

206

Emisja tlenku węgla z turbin gazowych

1. Tlenek węgla (CO) jest gazem bezbarwnym, bezwonnym, trującym.
2. W atmosferze powoli utlenia się do CO_2 z udziałem rodników OH.
3. Podczas spalania paliw kopalnych jest półproduktem spalania.
4. Obecność CO w spalinach jest wskaźnikiem niedoboru tlenu.

207

Przyczyny emisji CO

1. Spalanie z niedoborem tlenu ($\lambda < 1$).
2. Słabe mieszanie w 1-szej strefie spalania.
3. Gaszenie na ścianach płomienicy.
4. Zbyt krótki czas spalania.
5. Za niska temperatura dopalania (T < 1100 °C), która prowadzi do zamrożenia CO.

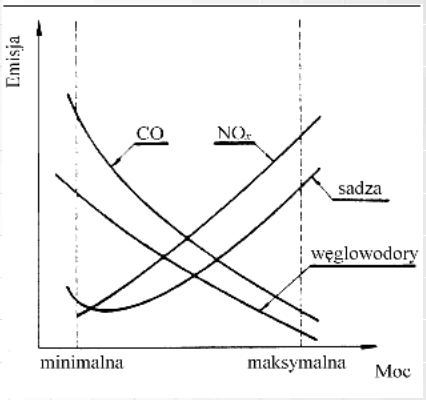
Kinetyka utleniania CO:

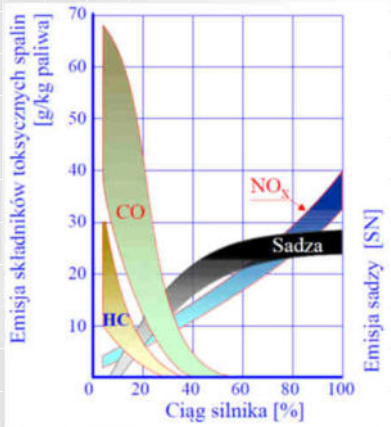
$$CO + OH = CO_2 + H$$

208

Wpływ obciążenia na emisję CO

Wprowadzenie powietrza do strefy dopalania (2-ej strefy spalania) powoduje obniżenie temperatury, co może zahamować utlenianie CO. Zagrożenie takie występuje zwłaszcza dla małych obciążeń.





209

Emisja węglowodorów

Emitowane z silników węglowodory to:

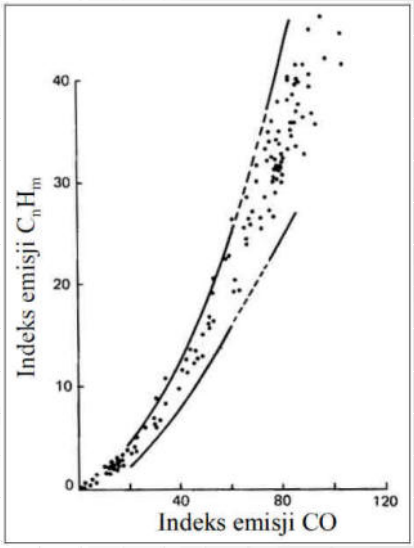
- niedopalone paliwo,
- produkty jego rozkładu,
- formowane w procesie spalania pochodne (np. WWA).

Ważniejsze źródła emisji węglowodorów:

- niedostateczne rozpylanie paliwa,
- za mała spalania prędkość spalania (krótki czas przebywania)
- niedostateczne mieszanie,
- gaszące działanie ścian płomienicy

210

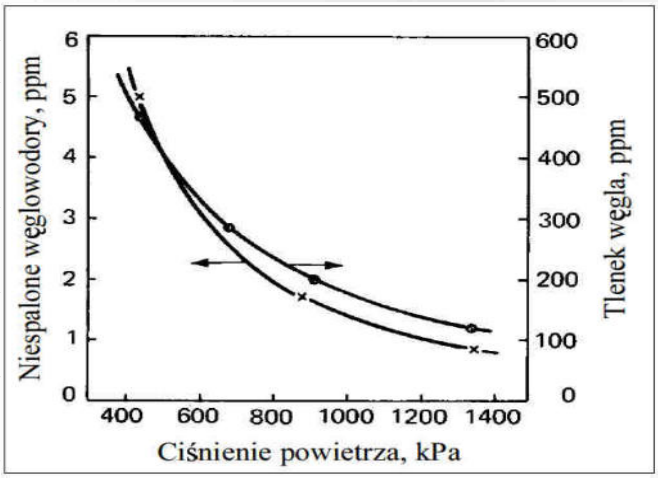
Emisja węglowodorów



Emisja węglowodorów koreluje z emisją CO.

211

Węglowodory – wpływ ciśnienia



Czułość emisji C_nH_m i CO na zmiany ciśnienia wynika z zależności szybkości reakcji od ciśnienia.

212

Tlenki azotu NOx - charakterystyka

Emitowane z silników tlenki azotu to:

- NO - tlenek azotu,
- NO_2 - ditlenek azotu (dwutlenek azotu),
- N_2O - tlenek diazotu (podtlenek azotu).

$$NO_x = NO + NO_2 \text{ (udział przeliczony na } NO_2)$$

Można wyróżnić trzy **najważniejsze mechanizmy powstawania** NOx w procesach spalania:

- **termiczny** (z azotu z powietrza),
- **szybki** zwany także płomieniowym (z azotu z powietrza),
- **paliwowy** (utlenianie związków azotowych zawartych w paliwie).

213

Tlenki azotu NOx – mechanizm termiczny

Mechanizm zaproponowany w 1946 przez znanego rosyjskiego fizyka Y.B. Zeldowicza:

$$O_2 + M = O + O + M$$

gdzie M jest stabilną cząstką dostarczającą energię do zerwania wiązania w O_2.

„Uwolnione" atomy O mogą reagować z N_2

$$O + N_2 \rightarrow NO + N$$

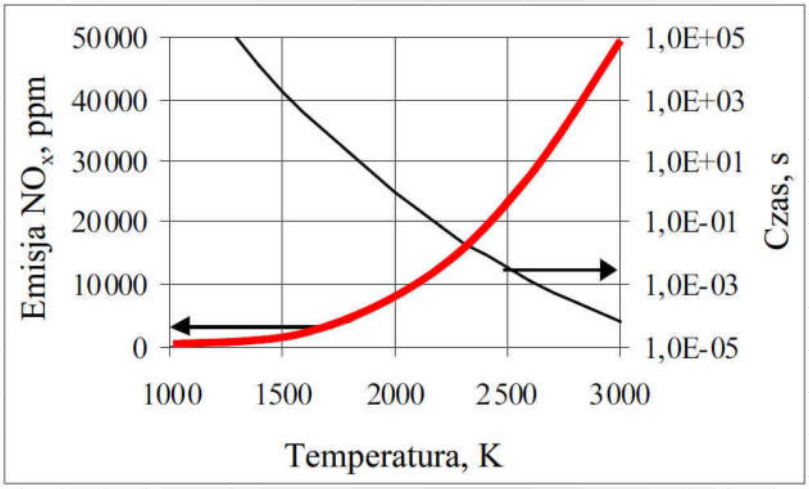
a „uwolnione" w tej reakcji atomy N szybko reaguj z O_2

$$N + O_2 \rightarrow NO + O$$

Mechanizm termiczny często nazywany jest mechanizmem Zeldowicza

214

Termczne tlenki azotu NO_x – wpływ temperatury



215

Tlenki azotu NOx – mechanizm szybki

Wiodącą rolę w powstawaniu szybkiego NO (ang. Prompt) odgrywają małe, reaktywne rodniki węglowodorowe, które pojawiają się na poziomie utleniania metanu. Najbardziej znaczące reakcje w tym mechanizmie to:

$$CH_2 + N_2 \rightarrow CHN + NH$$

$$CH + N_2 \rightarrow CHN + N$$

$$C + N_2 \rightarrow CN + N$$

Ogólnie powyższe reakcje można zapisać schematycznie:

$$CH_x + N_2 \rightarrow HCN \ \ i\ inne\ rodniki\ (CN, NH, N \ldots)$$

216

Tlenki azotu NOx – mechanizm paliwowy

Jeżeli w paliwie są związki azotowe to podczas spalania paliwa ulegają one w znacznym stopniu utlenieniu do tlenków azotu.

Ropa naftowa zawiera **azot paliwowy** od 0,01 do 0,3% wag., wyjątkowo jego udział sięga 0,9%. Są to głównie:

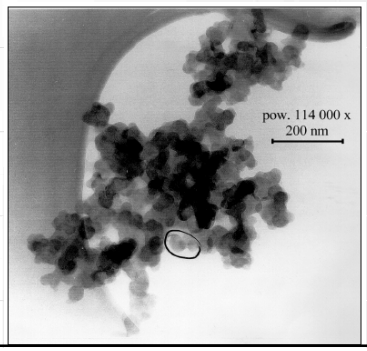
- pirydyny,
- indole,
- chinoliny,
- tetrahydrochinoliny,
- karbazole
- i pirole.

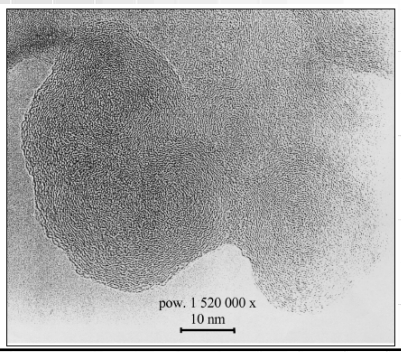
W czasie destylacji ropy naftowej kumulują się głównie w cięższych frakcjach.

217

Sadza - charakterystyka

Sadza jest substancją sypką, pylistą składającą się głównie z węgla (94 – 99%) z niewielkim udziałem wodoru (0,5 – 3%) oraz ze śladową ilością tlenu, azotu i siarki.
Rozmiary cząstek sadzy w zależności od warunków spalania mogą zmieniać się os 1 od 1000 nm. Sadza łatwo unosi się w powietrzu. Dym to aerozol sadzy w spalinach.





218

Sadza - powstawanie

Sadza powstaje podczas spalania węglowodorów, a także podczas spalania węgla: spalanie częci lotnych i smoły.
Reakcję chemiczną powstawania sadzy można umownie zapisać następująco:

$$C_mH_n + yO_2 \rightarrow 2yCO + 0,5nH_2 + (m - 2y)C$$

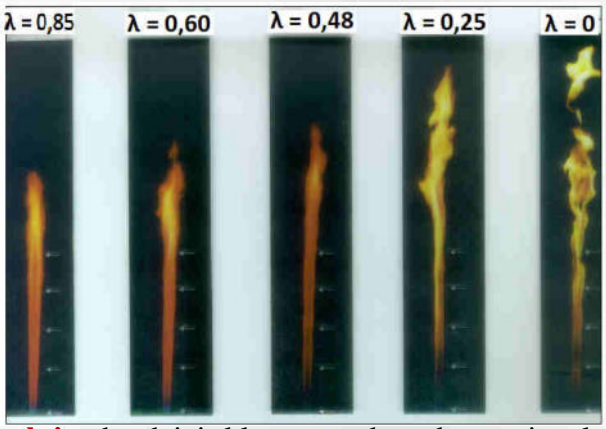
Ważniejsze czynniki mające wpływ na powstawanie sadzy:

- rodzaj płomienia (kinetyczny, dyfuzyjny),
- rodzaj paliwa (C/H) i stosunek C/O w mieszance palnej,
- temperatura,
- ciśnienie,
- czas przebywania.

219

Sadza – wpływ rodzaju płomienia

- płomienie kinetyczne
- płomienie dyfuzyjne (ang. *smoke point*)



Generalnie: bardziej skłonne są do sadzowania płomienie dyfuzyjne (nie wymieszane).

220

Ograniczanie emisji sadzy

Powstawanie sadzy w turbinach gazowych jest raczej kontrolowane przez **procesy fizyczne i rozpylanie** paliwa, a nie przez kinetykę chemiczną.

Podstawowe sposoby ograniczania emisji sadzy:

a) likwidacja „kieszeni" z bogatym składem mieszanki,

b) zwiększenie udziału powietrza w I-ej strefie spalania,

c) poprawa mieszania w I-ej strefie,

d) zmiana sposobu rozpylania paliwa z ciśnieniowego na pneumatyczny,

e) stosowanie soli niektórych metali do paliw.

221

Warunki uzyskania niskiej emisji w komorach spalania

- Utrzymanie w wąskich granicach temperatury w obszarze pierwotnego spalania
- Odparowanie paliwa przed komorą spalania
- Optymalne wymieszania paliwa i utleniacza
- Uzyskanie niezależności warunków spalania od obciążenia komory spalania
- Utrzymanie stabilności płomienia w pełnym zakresie pracy komory spalania (uniemożliwienie zdmuchnięcia płomienia)

222

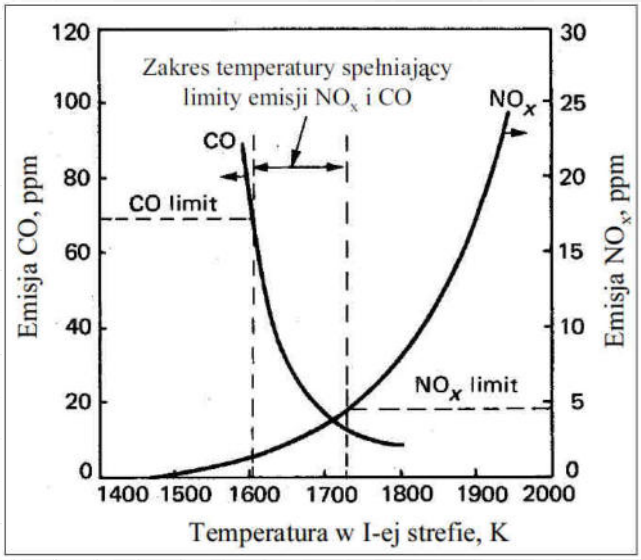
Ekologiczne kierunki rozwoju komór spalania

- Poprawa wstępnego przygotowania paliwa
- Wstępne odparowanie paliwa (LPP - lean premixed prevaporized)
- Stosowanie ubogich płomieni kinetycznych
- Unikanie płomieni dyfuzyjnych (wysoka emisja NO_x)
- Spalanie dwustopniowe
- Zastosowanie katalizatorów
- Regeneracja ciepła (odzysk ciepła ze spalin wylotowych
- Eliminacja siarki z paliwa

Zwykle w konflikcie stoi jednoczesne ograniczanie emisji CO i NO_x przez modyfikację spalania w I-ej strefie

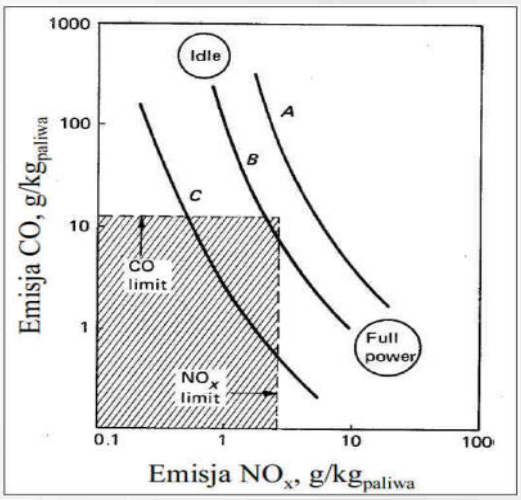
223

Jednoczesne ograniczenie emisji CO i NO_x



224

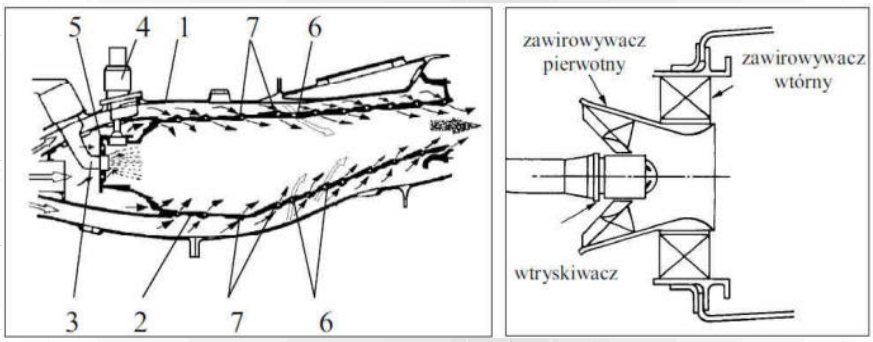
Przykład jednoczesnego ograniczenia emisji CO i NO_x



Systemy ze zmienną geometrią powinny współpracować z systemem odparowania paliwa w celu uniknięcia „hot spots”

225

Wstępne przygotowanie paliwa do komory spalania



1 – osłona komory (płaszcz), 2 – rura ogniowa, 3 – wtryskiwacz,
4 – świeca zapłonowa, 5 – otwór wlotowy powietrza pierwotnego,
6 – otwory wlotowe powietrza wtórnego, 7 – otwory wlotowe powietrza chłodzącego ścianki komory

226

Spalanie ubogich mieszanek

Zasadą jest całkowite odparowanie paliwa i kompletne jego wymieszanie z powietrzem, dzięki temu:

- unika się spalania kropel,
- spalając ubogą mieszankę obniża się średnią temperaturę spalania.

Systemy spalania ze wstępnym odparowaniem **LPP (Lean Premixed Prevaporized)** powinny współdziałać z systemami zmiennej geometrii, żeby uniknąć niebezpieczeństwa gaśnięcia płomienia przy DGW dla małych obciążeń.

227

Stopniowanie paliwa w komorach pierścieniowych

Obwodowe – część z komór spalania zostaje wyłączona (wadą jest gaszące działanie powietrza wypływającego z niepracujących dysz komory spalania).

Promieniowe – w podwójnej komorze spalania przy małym obciążeniu cały strumień paliwa podawany powinien być tylko do jednej z komór spalania

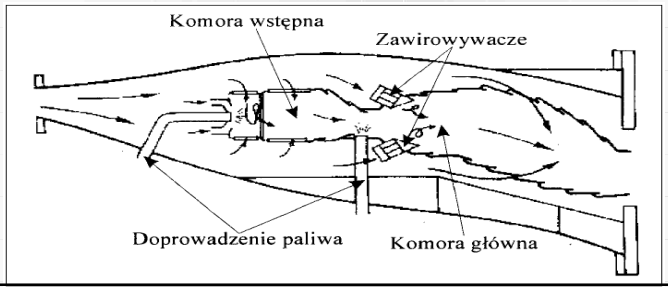
Osiowe – optymalne zaprojektowanie komory spalania na niskie obciążenie (przy dużym obciążeniu dodatkowy strumień paliwa podawany jest do strumienia gazów spalinowych za I-szą strefą).

228

Stopniowanie paliwa

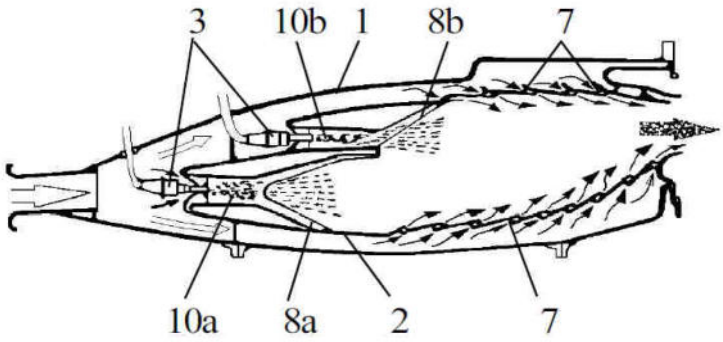
W turbinach gazowych zastosowane znalazło **stopniowanie osiowe paliwa.** Realizowane jest ono następująco:

- Mało obciążona I-sza strefa spalania ze starannym wymieszaniem pełniąca tak rolę stabilizatora dla głównej strefy spalania.
- Jedna lub kilka dodatkowych stref spalania, każda z oddzielnym zasilaniem paliwa i powietrza.



229

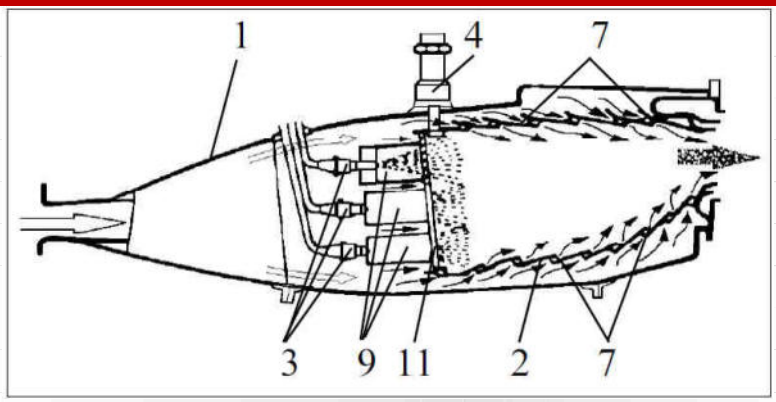
Spalanie dwustopniowe w komorze spalania



1 – osłona komory (płaszcz), 2 – rura ogniowa, 3 – wtryskiwacz, 4 – świeca zapłonowa, 5 – otwór wlotowy powietrza pierwotnego, 6 – otwory wlotowe powietrza wtórnego, 7 – otwory wlotowe powietrza chłodzącego ścianki komory, 8 – statecznik płomienia: a – pierwotnego, b – wtórnego, 9 – komora wirowa, 10 – komora wstępnego zmieszania: a – pierwotna, b – wtórna, 11 – diafragma (przesłona)

230

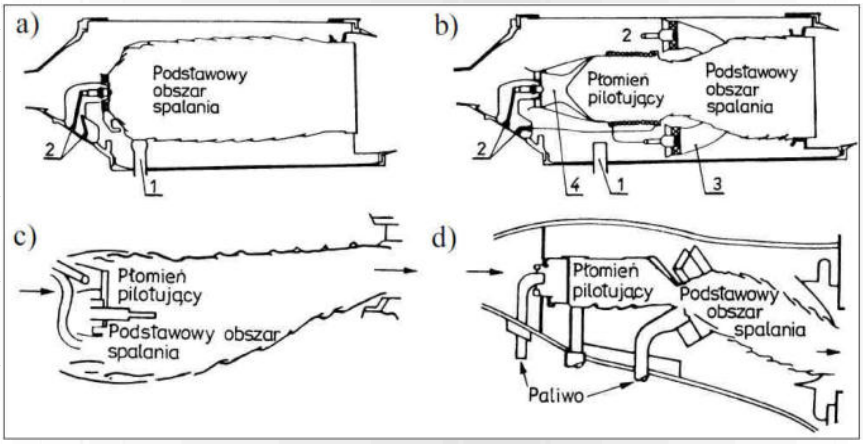
Spalanie wirowe w komorze spalania



1 – osłona komory (płaszcz), 2 – rura ogniowa, 3 – wtryskiwacz, 4 – świeca zapłonowa, 5 – otwór wlotowy powietrza pierwotnego, 6 – otwory wlotowe powietrza wtórnego, 7 – otwory wlotowe powietrza chłodzącego ścianki komory, 8 – statecznik płomienia: a – pierwotnego, b – wtórnego, 9 – komora wirowa, 10 – komora wstępnego zmieszania: a – pierwotna, b – wtórna, 11 – diafragma (przesłona)

231

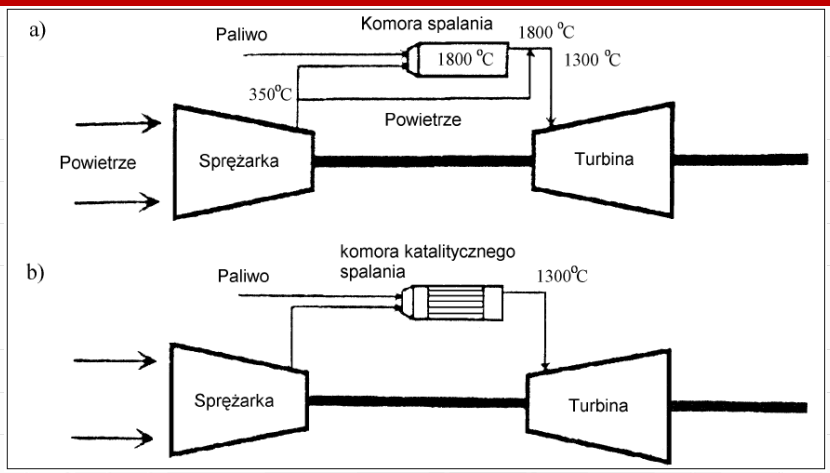
System komory spalania o niskiej emisji zanieczyszczeń



Zastosowanie płomienia pilotującego: 1 -świeca zapłonowa, 2 - doprowadzenie paliwa, 3 - kanał mieszania, 4 - kanał wstępnego mieszania

232

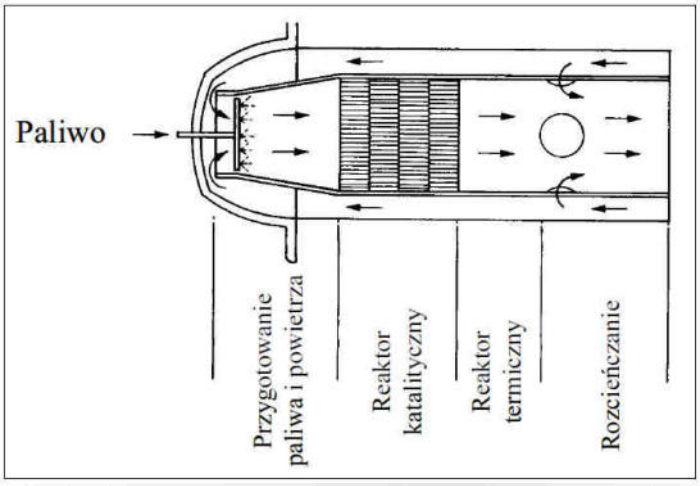
Zastosowanie katalizatorów



Wykorzystanie katalizatorów w komorach spalania pozwala na utlenianie paliwa w obniżonej temperaturze (**1000 K**), nawet niższej od odpowiadającej ubogiej granicy palności mieszanki.

233

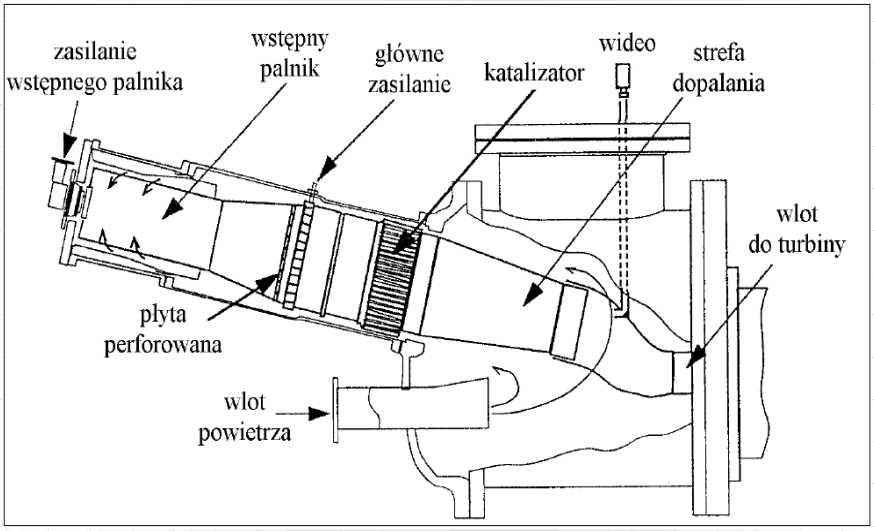
Komory spalania z reaktorami katalitycznymi



Umieszczenie w komorze spalania ceramicznego katalizatora umożliwia czyste, całkowite spalanie przy niskiej temperaturze.

234

Komory spalania z reaktorami katalitycznymi



235

Czynniki wpływające na emisją zanieczyszczeń z komory spalania

a) temperatura i współczynnik nadmiaru powietrza w I-ej strefie spalania,

b) stopień homogenizacji mieszanki w I-ej strefie spalania,

c) czas przebywania w I-ej strefie spalania,

d) charakterystyka gaszenia ścian płomienicy,

e) rola II-ej strefy spalania:

- dopalająca CO, C_nH_m i sadzy I-ej strefy,
- gasząca.

236

Ważniejsze czynniki wpływające na emisję CO

a) CO jest wytwarzane w I-ej strefie spalania w dużej ilości dla każdej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ,

b) dla bardzo ubogich mieszanek (λ > 2) temperatura jest zwykle zbyt niska, żeby dopalić CO,

c) dla stechiometrycznych i bogatych mieszanek (λ < 0,9) równowagowe stężenie CO przekracza limit emisji.

237

Metody ograniczania emisji CO

a) Poprawa rozpylania paliwa (szybsze odparowanie, homogenizacja i mieszanie),

b) Podział strumienia powietrza, żeby wytworzyć zbliżony do optymalnego skład mieszanki w I-ej strefie spalania (λ = 1,4),

c) Zwiększenie objętości (lub czasu przebywania) I-ej strefy,

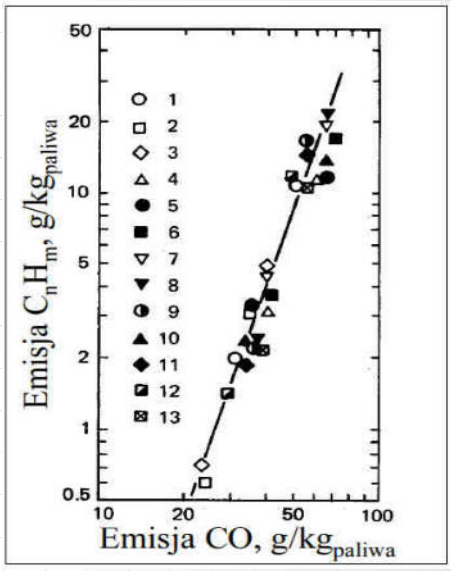
d) Zmniejszenie intensywności chłodzenia ścian (rury żarowej) płomienicy powietrzem,

e) Upuszczanie powietrza ze sprężarki przy małych obciążeniach w celu zwiększenia Φ i podwyższenia temperatury,

f) Stopniowanie paliwa polegaj ce na wyłączeniu części dysz paliwowych w I-ej strefie spalania i podaniu pozostałej części paliwa do II-ej strefy.

238

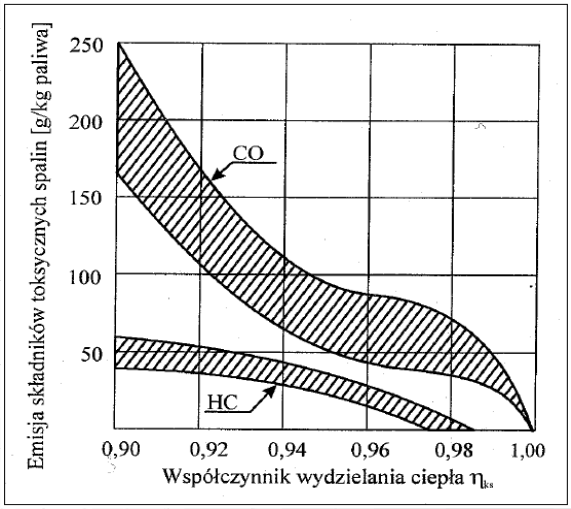
Redukcja emisji węglowodorów



Postępowanie w kierunki obniżania emisji C_nH_m jest podobne jak dla CO dlatego, że istnieje ścisła korelacja między emisją CO i C_nH_m.

239

Sprawność spalania a emisja CO i C_nH_m



Redukcja emisji CO i C_nH_m poprawia sprawność spalania η_s.

$$\eta_s = 1 - (C_nH_{mEI} + 0{,}232CO_{EI}) \cdot 10^{-3}$$

240

Metody ograniczania emisji NOx

a) spalanie ubogiej mieszanki w I-ej strefie spalania,

b) spalanie bogatej mieszanki w I-ej strefie spalania,

c) homogenizacja mieszanki palnej (poprawa rozpylania, parowania i mieszania),

d) zmniejszenie czasu przebywania w płomieniu,

e) wtrysk wody (metoda mokra kontroli NO_x),

f) recyrkulacja spalin.

241

Ograniczanie emisji NOx

W turbinach gazowych powstające NO_x mają głównie termiczny charakter:

$$NO_x \sim \exp(0{,}009 \cdot T)$$

gdzie:
T - temperatura spalania, K

Dlatego podstawowe przedsięwzięcia to:

a) obniżanie temperatury spalania (średniej),

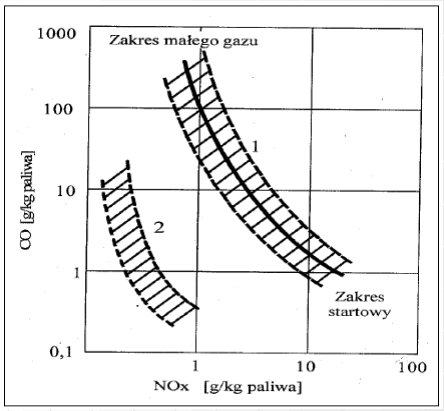
b) zmniejszanie czasu przebywania w strefie wysokich temperatur,

c) unikanie lokalnie wysokich temperatur (*hot spots* - pików).

242

Emisja Nox a emisja CO i C_nH_m

Obniżanie temperatury spalania i unikanie wysokich temperatur stoi w sprzeczności z filozofią ograniczania emisji CO i C_nH_m, dlatego istnieje **ujemna korelacja** między tymi dwoma emisjami.



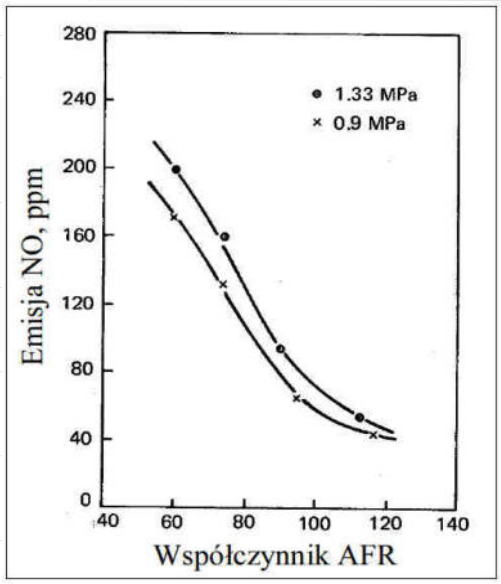
Zależność emisji CO i NOx dla różnych zakresów pracy dwuprzepływowego turbinowego silnika lotniczego:

1 - obszar dla silników eksploatowanych,

2 - obszar dla silników perspektywicznych

243

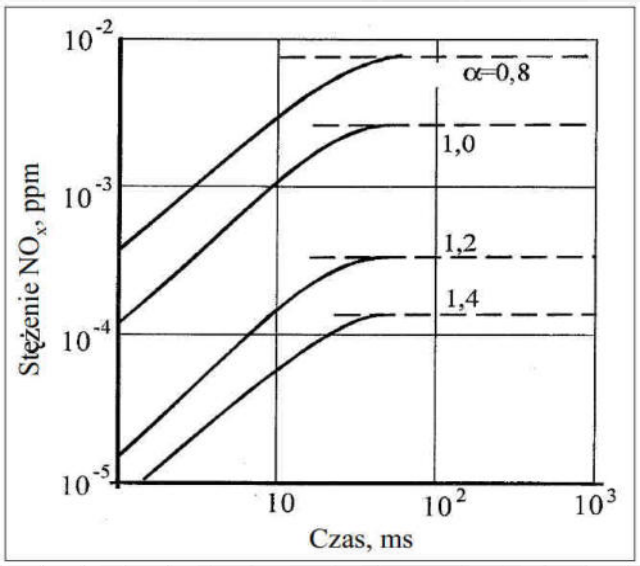
Spalanie ubogiej mieszanki w I-szej strefie spalania



Wpływ współczynnika AFR na emisję NOx (temperatura powietrza 600 K)

244

Wpływ czasu przebywania w strefie spalania na emisję NO_x



245

Literatura

Włodzimierz Kordylewski (red.), *Spalanie i Paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005

Marian Gieras, *Komory spalania silników turbinowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010

P. Dzierżanowski i inni, *Turbinowe silniki odrzutowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983

P. Dzierżanowski i inni, *Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985

B. Maclsaac, R. Langton, *Gas Turbine Propulsion Systems*, Wiley 2011

Gabriel D. Roy (ed.), *Combustion Processes i Propulsion – Control, Noise and Pulse Detonation*, Elsevier 2006

Materiały pomocnicze do wykładu „Spalanie i paliwa”

Jerzy Merkisz, *Ekologia w lotnictwie*, Poznań – Lotnictwo dla Obronności, 2016

246