

Spalanie

- Spalanie węglowodorów
- Granice palności
- Palnik
- Zapłon punktowy
- Zapłon objętościowy

Spalanie

- Spalanie jest utlenianiem paliwa. Najczęściej tlen potrzeby do utleniania paliwa pobieramy z powietrza.
- Proces utleniania paliw chemicznych nie będących pierwiastkami chemicznymi jest ciągiem złożonych reakcji chemicznych.

Spalanie

Kolejność i rodzaj reakcji zachodzących podczas spalania zależy od wielu czynników, z których najważniejszymi są:

- parametry termodynamiczne procesu
- skład chemiczny paliwa
- zawartość tlenu w powietrzu
- skład chemiczny gazów zawartych w powietrzu
- sposób spalania

Spalanie

W przypadku spalania węglowodorów reakcje występujące podczas spalania można podzielić następująco:

- reakcje rozerwania łańcucha węglowodoru
- reakcje odwodornienia łańcucha i utleniania wodoru
- reakcje utleniania węgla do tlenku węgla
- reakcje utleniania tlenku węgla do dwutlenku węgla

Spalanie

Reakcje te są głównie reakcjami;

- 1 rzędu; $A \rightarrow M + N$
- 2 rzędu; $A + B \rightarrow M + N + R$

Reakcje wyższych rzędów, są mało prawdopodobne i nie mają wpływu na przebieg spalania.

Spalanie

- Spalanie węglowodorów jest ciągiem reakcji 1 rzędu i 2 rzędu (reakcja łańcuchowa).
- Reakcja rozerwania łańcucha węgla dotyczy wszystkich węglowodorów z wyjątkiem metanu.
- Rozerwanie łańcuchów otwartych zachodzi w niższej temperaturze niż łańcuchów zamkniętych (węglowodory pierścieniowe).

Spalanie

Ciąg reakcji składających się na proces utleniania można podzielić na:

- reakcje przedpłomieniowe
- reakcje płomieniowe

Spalanie

- Reakcje przedpłomieniowe są to reakcje, w których następuje częściowy rozpad cząstki paliwa i częściowe utlenienie niektórych fragmentów cząstki paliwa bez pojawienia się płomienia.
- Reakcje przedpłomieniowe mogą zachodzić w stosunkowo niskich temperaturach

Spalanie

- Płomień stanowią zjonizowane cząstki i atomy świecące w skutek rekombinacji elektronów. Pojawienie się płomienia oznacza temperaturę gazu powyżej 1200 [°C].

Spalanie

- Przejście od reakcji przedpłomieniowych do reakcji płomieniowych może być określone przy pomocy temperatury samozapłonu.
- Temperatura samozapłonu jest to najniższa temperatura paliwa, przy której paliwo zapala się (reakcja płomieniowa) bez udziału otwartego płomienia.

Spalanie

- Rozrywanie łańcuchów węglowodorów i ich odwodornienie limituje przebieg reakcji przedpłomieniowych, a przez to decyduje o temperaturze samozapłonu węglowodoru.
- Krótsze łańcuchy węglowodorów wymagają do rozerwania wyższych temperatur.
- Najwyższą temperaturę samozapłonu dla węglowodorów ma metan.

Spalanie

- Po rozerwaniu łańcuchów węglowodorów o przebiegu reakcji decyduje dostępność tlenu.
- Przy niedoborze tlenu reakcją uprzywilejowaną jest utlenianie wodoru.
- Przy wystarczającej ilości tlenu utlenianie wodoru i węgla zachodzi równocześnie, przy czym utlenianie węgla jest dwuetapowe.

Spalanie

- Najpierw utleniany jest węgiel do tlenku węgla, a później tlenek węgla do dwutlenku węgla.
- Reakcja utleniania węgla do tlenku węgla wymaga wyższej temperatury, niż reakcja utleniania tlenku węgla do dwutlenku węgla.

Spalanie

Paliwa chemiczne spalane w powietrzu można podzielić na:

- paliwa spalające się na powierzchni (spalanie powierzchniowe)
- paliwa spalające się w całej objętości (spalanie objętościowe)

Spalanie

Spalanie na powierzchni paliwa zachodzi przy spalaniu paliw posiadających powierzchnię swobodną, czyli paliw stałych tworzących bryły i cieczy wypełniających naczynie.

Spalanie

- Podczas spalania paliwo stałe lub ciekłe ulega podgrzaniu, co powoduje jego parowanie (dla ciała stałego resublimację).
- Paliwa ciekłe spalają się jako pary, a paliwa stałe mogą spalać się jako pary.
- Para, jako stan lotny miesza się z powietrzem i spalanie par paliwa jest spalaniem objętościowym.

Spalanie

- Paliwo ciekłe rozpylone na krople o rozmiarach rzędu 0,05 [mm] wymieszane z powietrzem spalają się objętościowo.
- Ciało stałe rozdrobnione na odpowiednio małe ziarna, rzędu 0,05 [mm], po wymieszaniu z powietrzem (rozpyleniu) także spalają się objętościowo.

Spalanie

Paliwo spalane objętościowo tworzy z powietrzem mieszanke paliwowo-powietrzną. Mieszanki paliwowo-powietrzne tworzą:

- gazy
- ciecze po odparowaniu lub rozpyleniu
- pyły (ziarna o rozmiarach rzędu 0,05 [mm]) po rozpyleniu.

Spalanie

Parametrem określającym możliwość zapalenia paliwa jest:

- dla ciał stałych spalanych w bryle i cieczy spalanych w zbiorniku temperatura zapłonu
- dla mieszanek paliwowo-powietrznych granice palności

Spalanie

- Temperatura zapłonu jest to najniższa temperatura paliwa, przy której można zapalić paliwo otwartym płomieniem
- Temperatura zapłonu zależy od lotności paliwa

Spalanie

- Paliwa ciekłe łatwiej parujące mają niższą temperaturę zapłonu.
- W przypadku paliw stałych o temperaturze zapłonu decyduje zawartość składników łatwo ulegających sublimacji, czyli składników lotnych.
- Składnikami lotnymi paliw stałych nazywamy te składniki, które przechodzą w stan lotny przy podgrzaniu paliwa.
- Paliwa nie zawierające składników lotnych np. koks mają najwyższe temperatury zapłonu

Spalanie

- Granice palności określone są przy pomocy współczynnika nadmiaru powietrza λ .
- Współczynnik nadmiaru powietrza określa stosunek powietrza dostarczonego do spalania do powietrza potrzebnego do całkowitego spalania paliwa

Spalanie

$$\lambda = \frac{m_{\text{powietrze dostarczone}}}{m_{\text{powietrze całkowite spalanie}}}$$

Spalanie

- Dla $\lambda = 0$ mieszanka paliwowo-powietrza nie zawiera powietrza i w związku z tym jest niepalna.
- Zwiększając wartość współczynnika nadmiaru powietrza mieszanka paliwowo-powietrzna zapali po uzyskaniu przez współczynnik nadmiaru powietrza pewnej wartości nazywanej górną granicą palności λ_g .
- Górna granica palności dotyczy mieszanek paliwowo-powietrznych o nadmiarze paliwa, czyli mieszanek bogatych (w paliwo).

Spalanie

- Dla $\lambda = \infty$ mieszanka paliwowo-powietrzna nie zawiera paliwa i w związku z tym także jest niepalna.
- Zmniejszając wartość współczynnika nadmiaru powietrza mieszanka paliwowo-powietrzna zapali po uzyskaniu przez współczynnik nadmiaru powietrza pewnej wartości nazywanej dolną granicą palności λ_d .
- Dolna granica palności dotyczy mieszanek paliwowo-powietrznych o niedoborze paliwa, czyli mieszanek ubogich (w paliwo).

Spalanie

Mieszanka paliwowo-powietrzna będzie zapalna w granicach palności, czyli współczynnik nadmiaru powietrza będzie większy od dolej granicy palności i mniejszy od górnej granicy palności.

$$\lambda_g < \lambda < \lambda_d$$

Spalanie

Granice zapalności zależą od wielu czynników i najczęściej mieszczą się w następującym zakresie:

- $\lambda_g = 0,25 \div 0,4$
- $\lambda_d = 1,3 \div 1,8$

Spalanie

- Górna granica palności ma stosunkowo małą wartość i mieszanki bogate są łatwo zapalne.
- Dolna granica palności także ma stosunkowo małą wartość i mieszanki ubogie są trudno zapalne

Spalanie

- Skład mieszanki paliwowo-powietrznej może być określony przez podanie zawartości paliwa w mieszance paliwowo-powietrznej.
- Udział objętościowy paliwa w mieszance paliwowo-powietrznej określany jest symbolem r_{pal} lub c .
- Udział objętościowy paliwa w mieszance paliwowo-powietrznej jest udziałem objętościowym składnika mieszaniny gazów.

Spalanie

$$r_{pal} = \frac{V_{paliwo}}{V_{powietrze+paliwo}}$$

Spalanie

Granice palności określone przy pomocy udziału objętościowego udziału paliwa w mieszaninie paliwowo-powietrznej mieszczą się w następującym zakresie

- $r_g = 6\% \div 15\%$

- $r_d = 1\% \div 5\%$

Spalanie

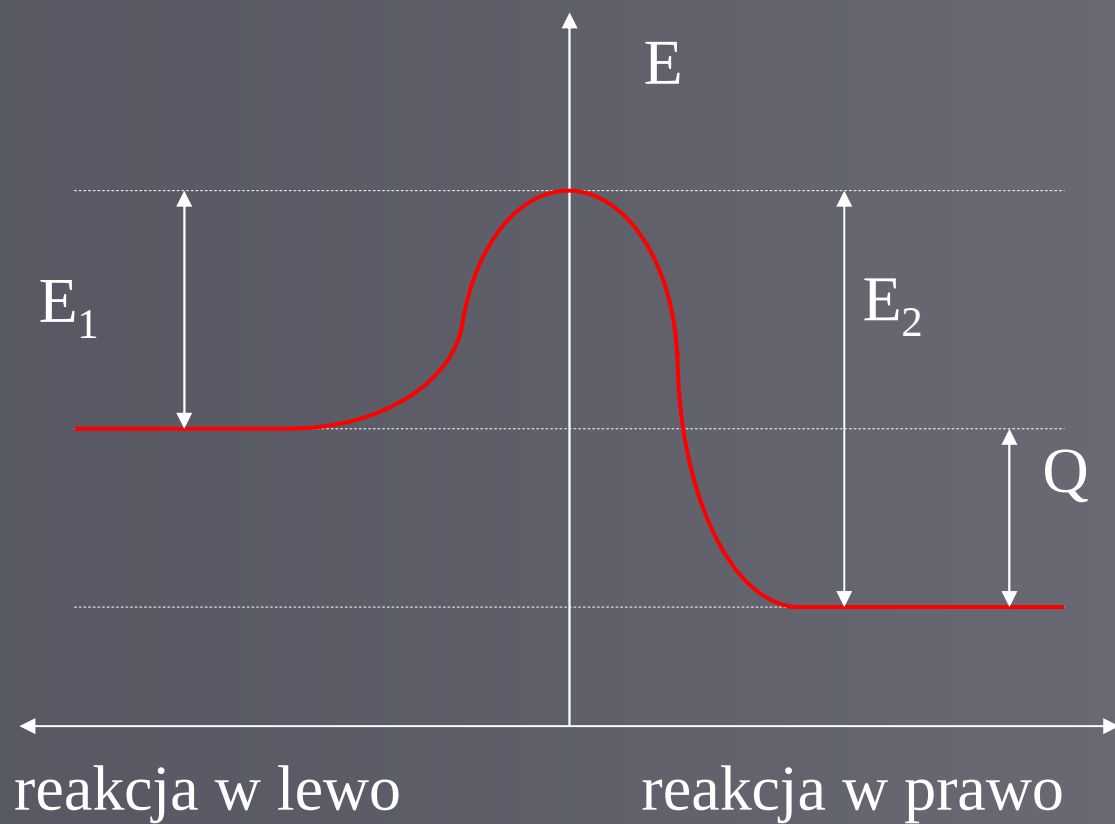
Granice palności nie mają dla danej mieszanki paliwowo-powietrznej stałej wartości i zależą od wielu czynników, a w szczególności od:

- parametrów termodynamicznych mieszanki paliwowo-powietrznej
- składu chemicznego mieszanki paliwowo-powietrznej

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- Energia aktywacji jest to bariera energetyczna, jaką musi pokonać cząstka, aby mogła zajść reakcja.
- Jeśli energia aktywacji reakcji egzotermicznej (reakcja w prawo, $Q > 0$) wynosi E_1 , to produkty reakcji będą posiadały energię E_2

$$E_2 = E_1 + Q$$

Spalanie

Dla reakcji endotermicznej (reakcja w lewo, $Q < 0$) energia aktywacji wynosi E_2 , a produkty reakcji będą posiadały energię E_1

$$E_1 = E_2 - Q$$

Spalanie

W skład mieszanki paliwowo-powietrznej wchodzi gazy niepalne. Gazy niepalne mogą być gazami:

- obojętnymi (nie wpływają na przebieg procesu spalania)
- inhibitorami (utrudniają przejście spalania z fazy przedpłomieniowej do fazy płomieniowej)

Spalanie

Gazami obojętnymi są:

- azot N_2
- dwutlenek węgla CO_2
- para wodna H_2O

Spalanie

- Inhibitory wywołują reakcje endotermiczne.
- Wyższa energia aktywacji obniża szybkość zachodzenia i obniża temperaturę produktów reakcji, co powoduje przerwanie łańcucha reakcji przedpłomieniowych.
- Inhibitorami są związki metaloorganiczne, zwłaszcza metali ciężkich

Spalanie

- Spalanie ciągłe może być opisane modelem palnika inżektorowego.
- W palniku inżektorowym strumień paliwa wypływający z dyszy z dużą prędkością wytwarza podciśnienie.
- Podciśnienie strumienia paliwa zasysa powietrze do wnętrza strumienia paliwa i wywołuje mieszanie paliwa z powietrzem.
- Zasysane powietrze jest tzw. powietrzem pierwotnym i tworzy bogatą mieszankę paliwowo-powietrzna o $\lambda < 1$.

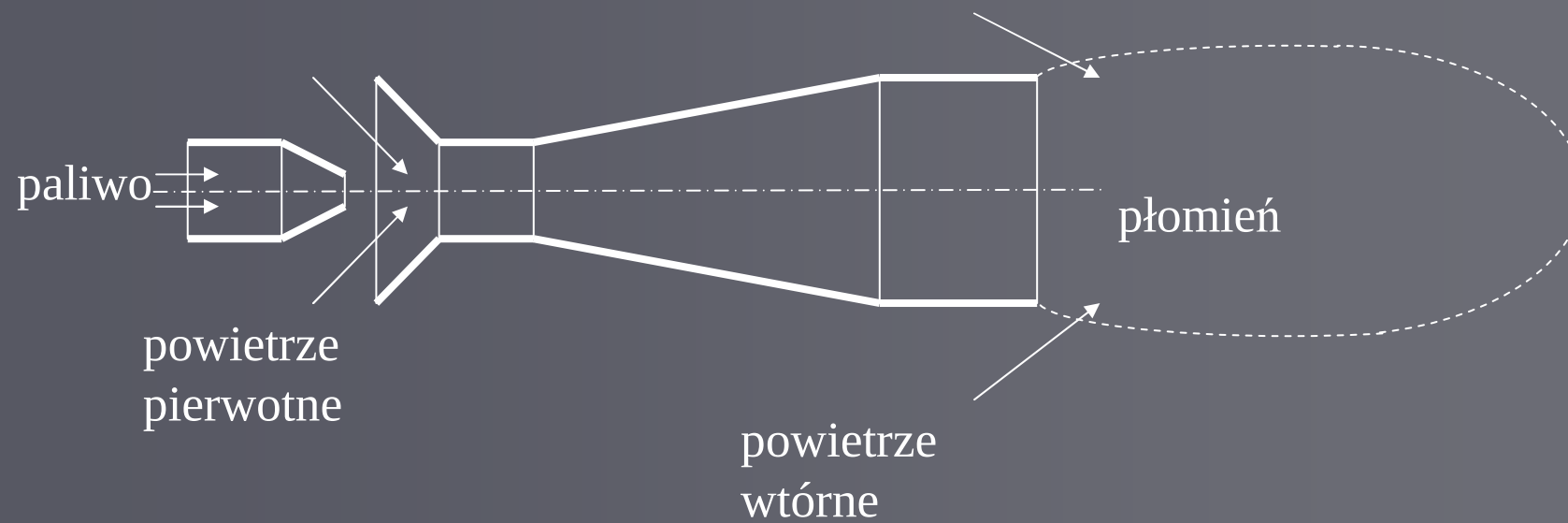
Spalanie

- Pozostałe powietrze potrzebne do pełnego i całkowitego spalania tzw. powietrze wtórne wnika w obszar spalania z atmosfery otaczającej płomień.

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



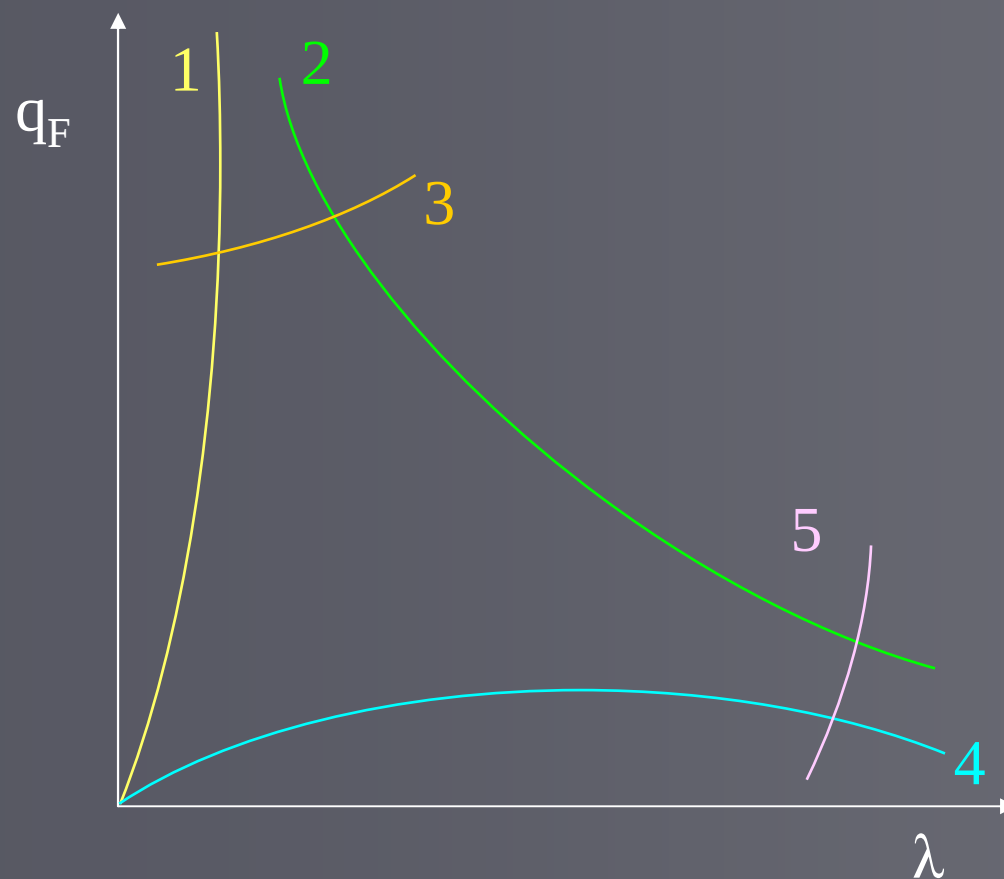
Spalanie

- Praca palnika zależy od współczynnika nadmiaru powietrza określonego dla powietrza pierwotnego i prędkości dostarczania (natężenia przepływu) paliwa do obszaru spalania.
- Parametrem równoważnym prędkości dostarczania paliwa do obszaru spalania jest jednostkowe obciążenie cieplne przekroju poprzecznego płonienia q_F [W/m₂].

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

Obszar stabilnego spalania ograniczony jest krzywymi:

- 1 – krzywa tzw. żółtych płomieni; spalanie niepełne; niedostatek tlenu w obszarze spalania
- 2 – krzywa oderwania płomienia; prędkość przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej większa od prędkości spalania
- 3 – krzywa niezupełnego spalania; mechanizm pośredni między krzywymi 1 i 2
- 4 – krzywa cofania płomienia; zbyt mała prędkość przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej
- 5 – krzywa maksymalnego zassania powietrza; mieszanka uboga, niepalna.

Spalanie

- Krzywe 2 i 4 ograniczają zakres stabilnego spalania ze względu na warunek równości prędkości spalania i prędkości przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej.

Spalanie

- Dla krzywej 2 płomień jest zdmuchiwany, ponieważ w całym obszarze spalania prędkość przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej jest większa od prędkości spalania.
- Zdmuchnięcie płomienia może nastąpić w wyniku zwiększenia prędkości dostarczania paliwa, jak i wyniku zwiększenia prędkości pobierania powietrza.

Spalanie

- Dla krzywej 4 płomień się cofa, ponieważ w całym obszarze spalania prędkość przepływu mieszanki paliwowo-powietrznej jest mniejsza od prędkości spalania.

Spalanie

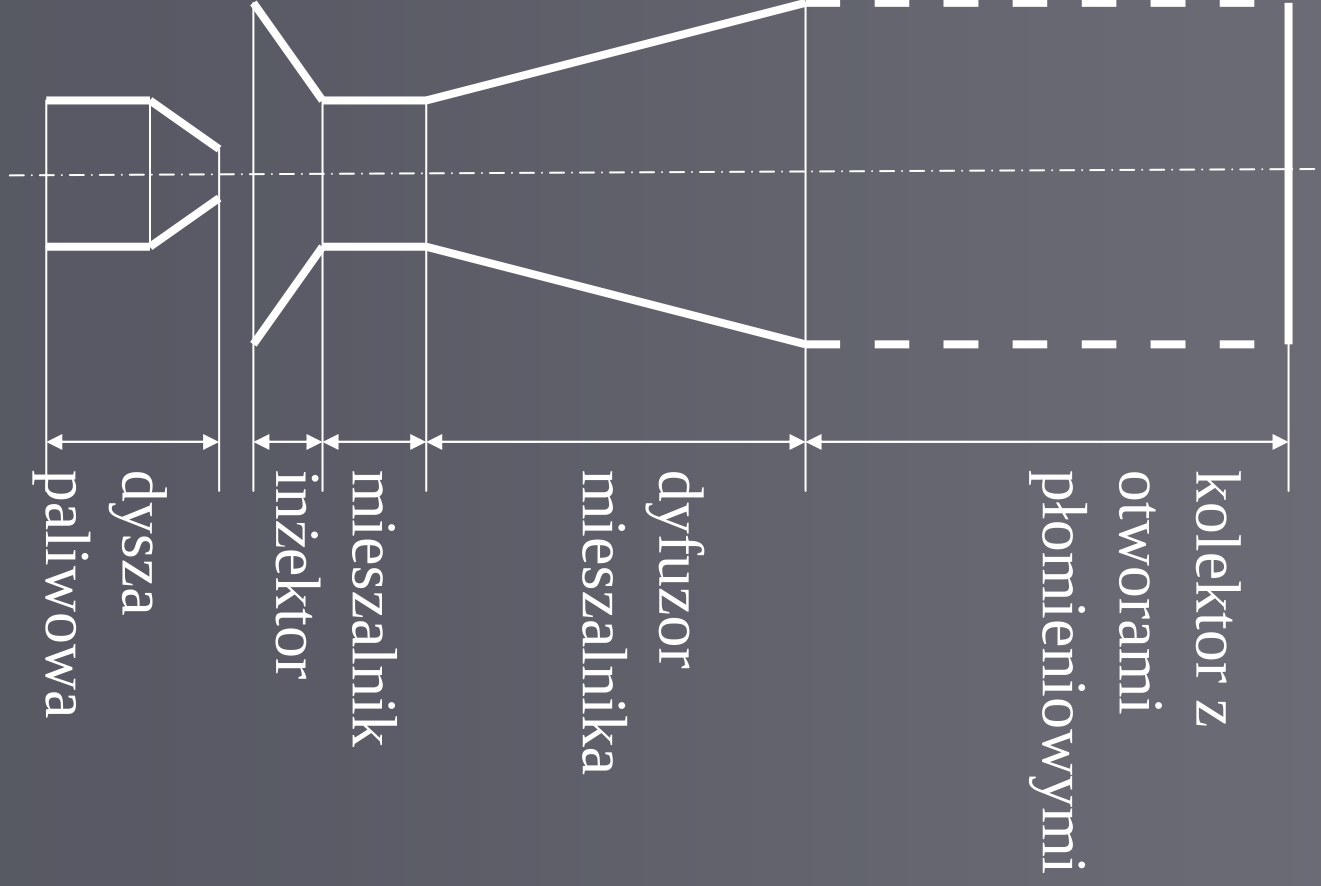
- Krzywe 1 i 5 ograniczają zakres stabilnego spalania ze względu na warunek palnego składu mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Dla krzywej 1 mamy niepalna mieszanekę bogatą, a dla krzywej 5 mamy niepalna mieszanekę ubogą.

Spalanie

- Paliwa o większych prędkościach spalania są bardziej zagrożone cofnięciem płomienia, a paliwa o mniejszych prędkościach spalania są bardziej zagrożone oderwaniem płomienia.

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- Zastosowanie otworów płomieniowych w kolektorze palnika zapobiega zjawisku cofania się płomienia.
- Przy prawidłowo dobranej średnicy i ilości otworów płomieniowych prędkość wypływu płomienia przez otwory płomieniowe jest równa prędkości spalania.

Spalanie

Wygaszanie płomienia opisują dwa mechanizmy:

- kinetyczny; spadek temperatury płomienia poniżej 1200 [$^{\circ}\text{C}$] i spadek prędkości rozprzestrzeniania się płomienia poniżej 5[cm/s]
- hydrodynamiczny; rozciągnięcie płomienia

Spalanie

- Szczególnym przypadkiem wygaszania płomienia jest wygaszanie na ścianie. Ścianki komory spalania mają temperaturę znacznie niższą od temperatury płomienia.
- Powoduje to silne odprowadzanie ciepła od płomienia do ścianki. Minimalna odległość od ścianki, przy której może przemieszczać się płomień nazywamy odległością wygaszania.

Spalanie

- Płomień można wygasić przez oddziaływanie inhibitorów.
- Działanie inhibitorów polega na wytwarzaniu gazów neutralnych obniżających temperaturę płomienia i redukowaniu ilości rodników, co zwalnia reakcje chemiczne spalania.

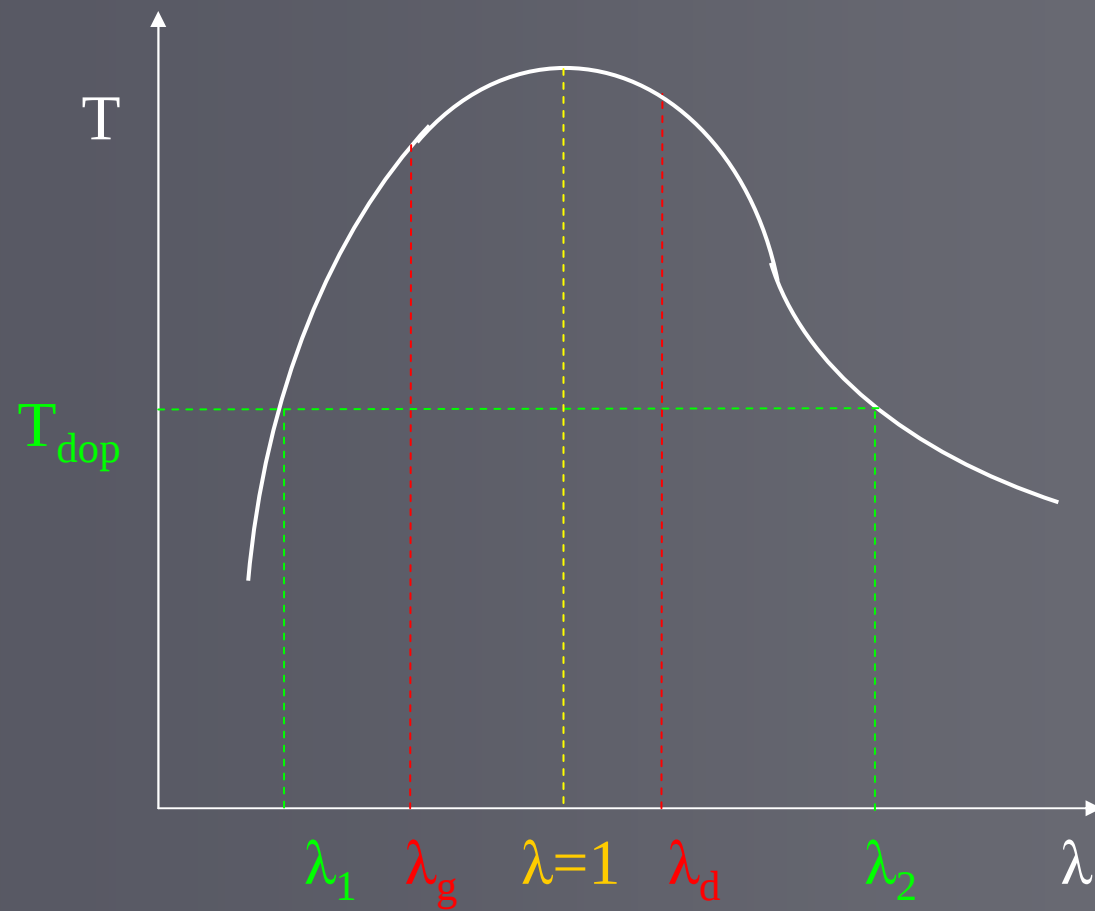
Spalanie

- Temperatura spalania węglowodorów przy współczynniku nadmiaru powietrza zbliżonym do jedności wynosi $2000 \div 2300$ [K].
- Dopuszczalna temperatura spalin wpływających na turbinę silnika turbodoładowanego wynosi $1150 \div 1300$ [K].

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- Obniżenie temperatury spalin zapewnia powietrze wtórne. Współczynnik nadmiaru powietrza dla powietrza pierwotnego jest zbliżony do jedności.
- Całkowity współczynnik nadmiaru powietrza z uwzględnieniem powietrza wtórnego wynosi $\lambda = 3,5 \div 5$.

Spalanie

- Prędkość wypływu powietrza ze sprężarki silnika turbodrzutowego wynosi $100 \div 120$ [m/s].
- Sprężarka silnika turbodrzutowego jest połączona z komorą spalania częścią dyfuzorową zmniejszającą prędkość przepływu powietrza do wartości $60 \div 70$ [m/s].
- Strumień pierwotny wpływa do komory spalania przez zawirowywacz, który zmniejsza prędkość osiową powietrza do wartości $15 \div 25$ [m/s].

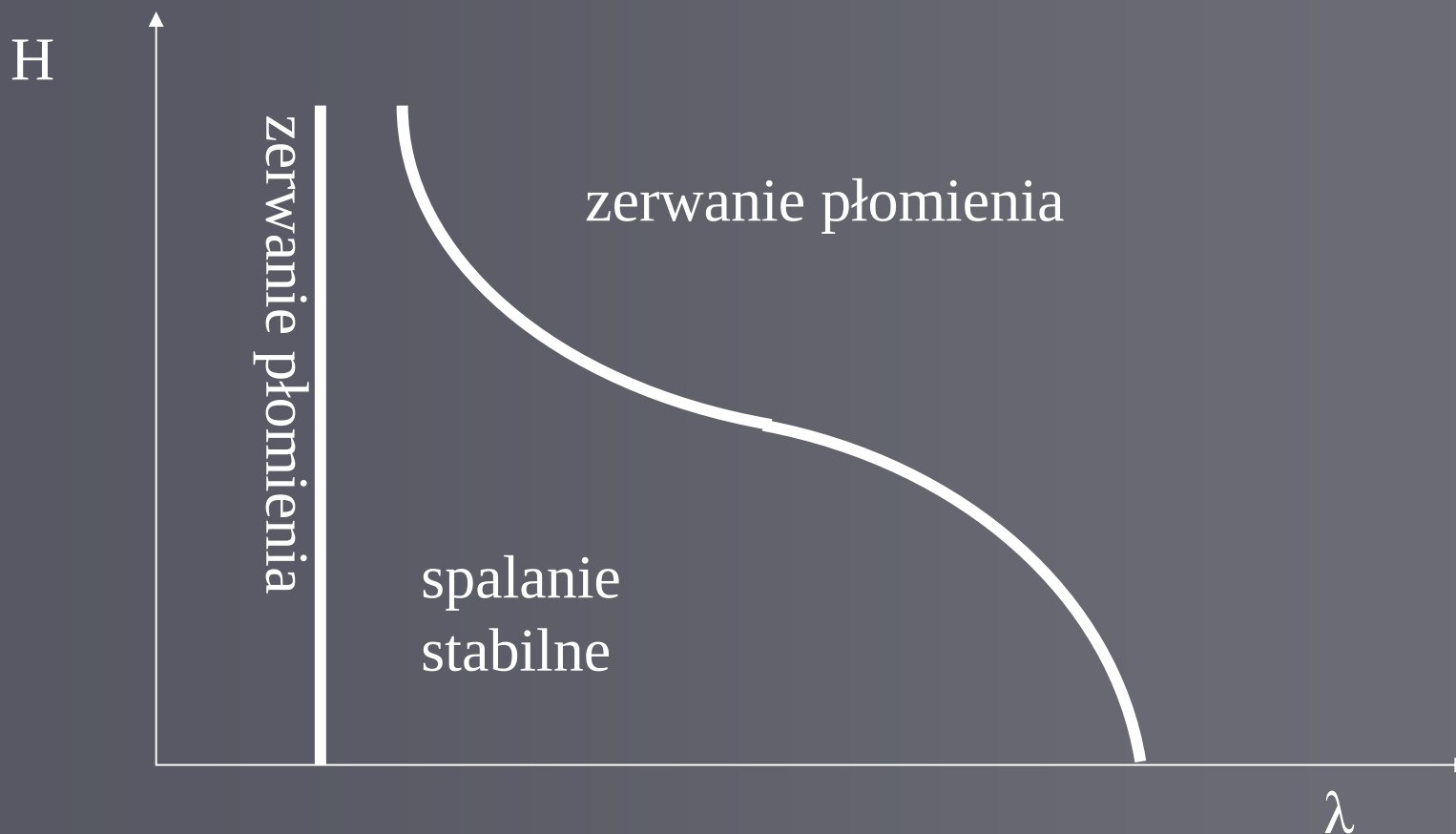
Spalanie

- Spalanie w silnikach lotniczych zależy od parametrów lotu. Stabilne spalanie zależy od wysokości lotu i prędkości obrotowej turbiny.
- Wzrost wysokości lotu związany jest ze spadkiem gęstości powietrza, co wpływa na granice zapalności mieszanek paliwowo-powietrznych.

w12

Spalanie

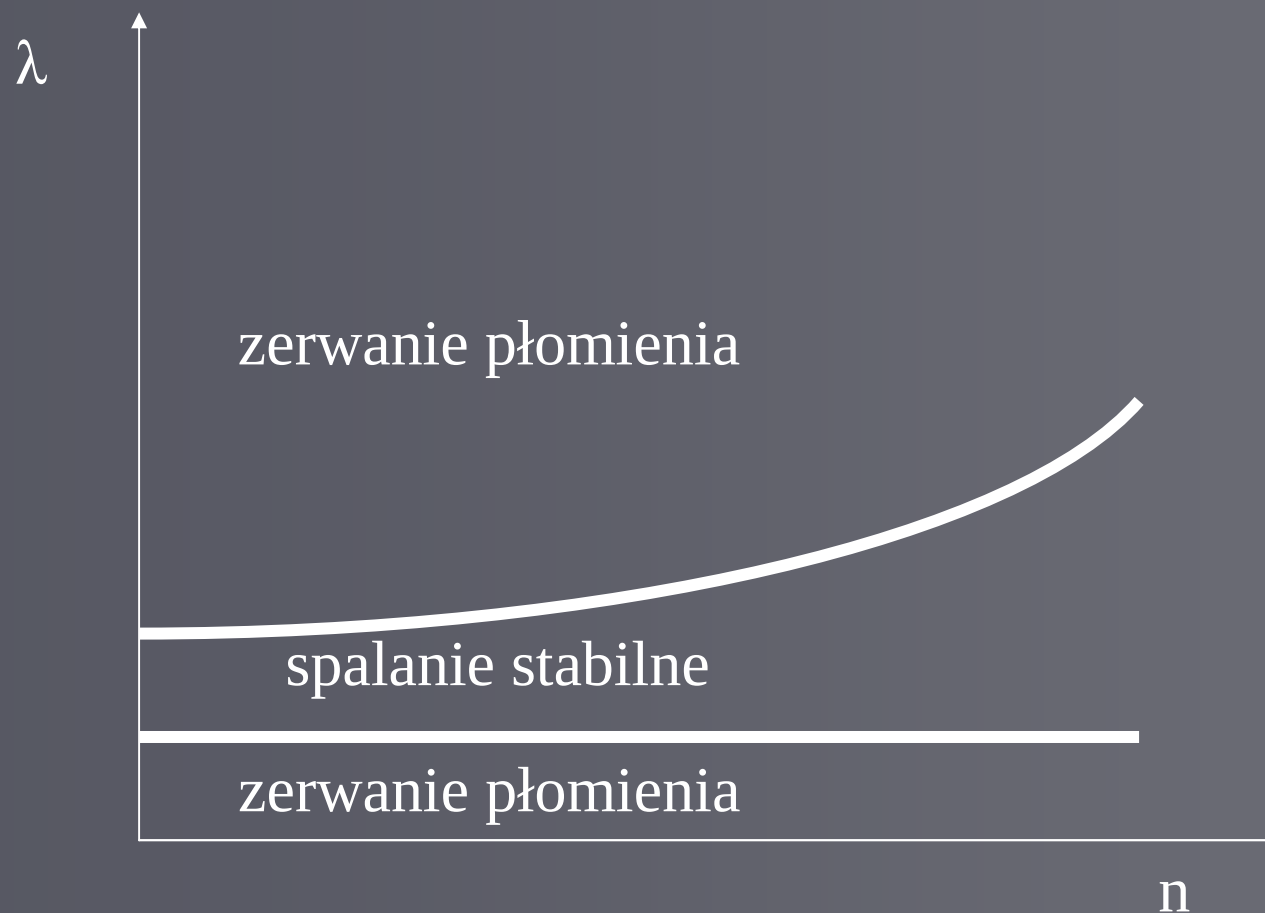
Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

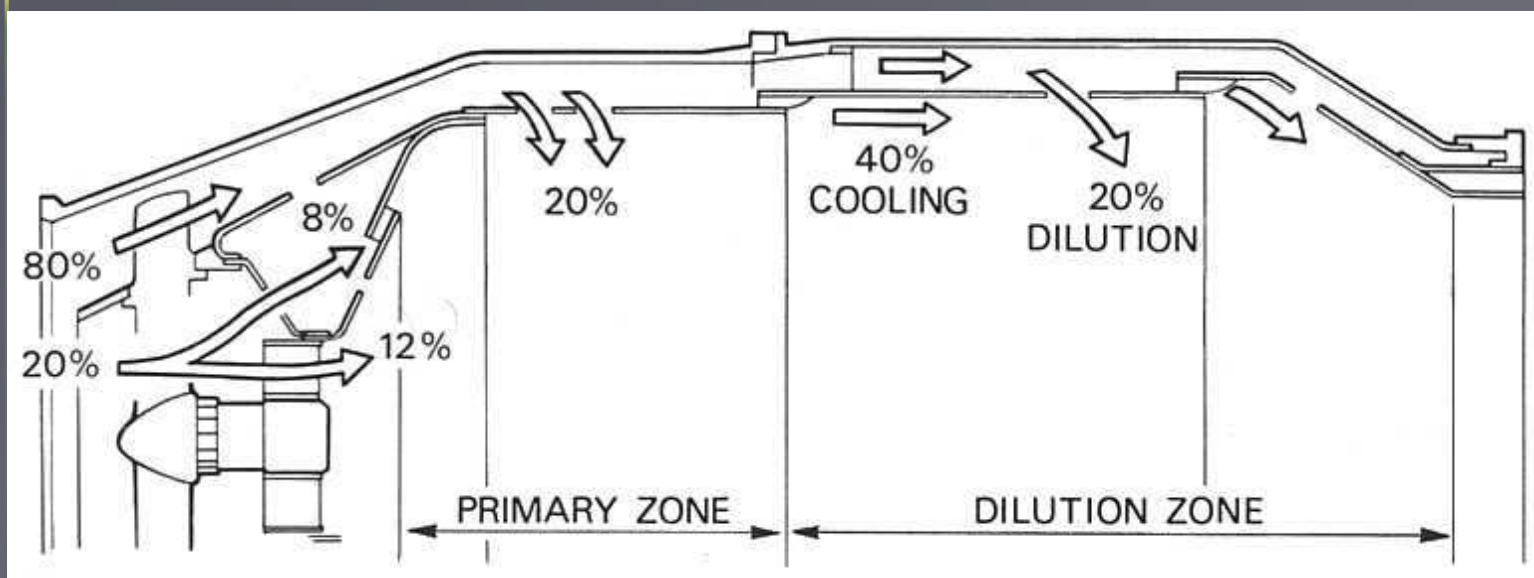
Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

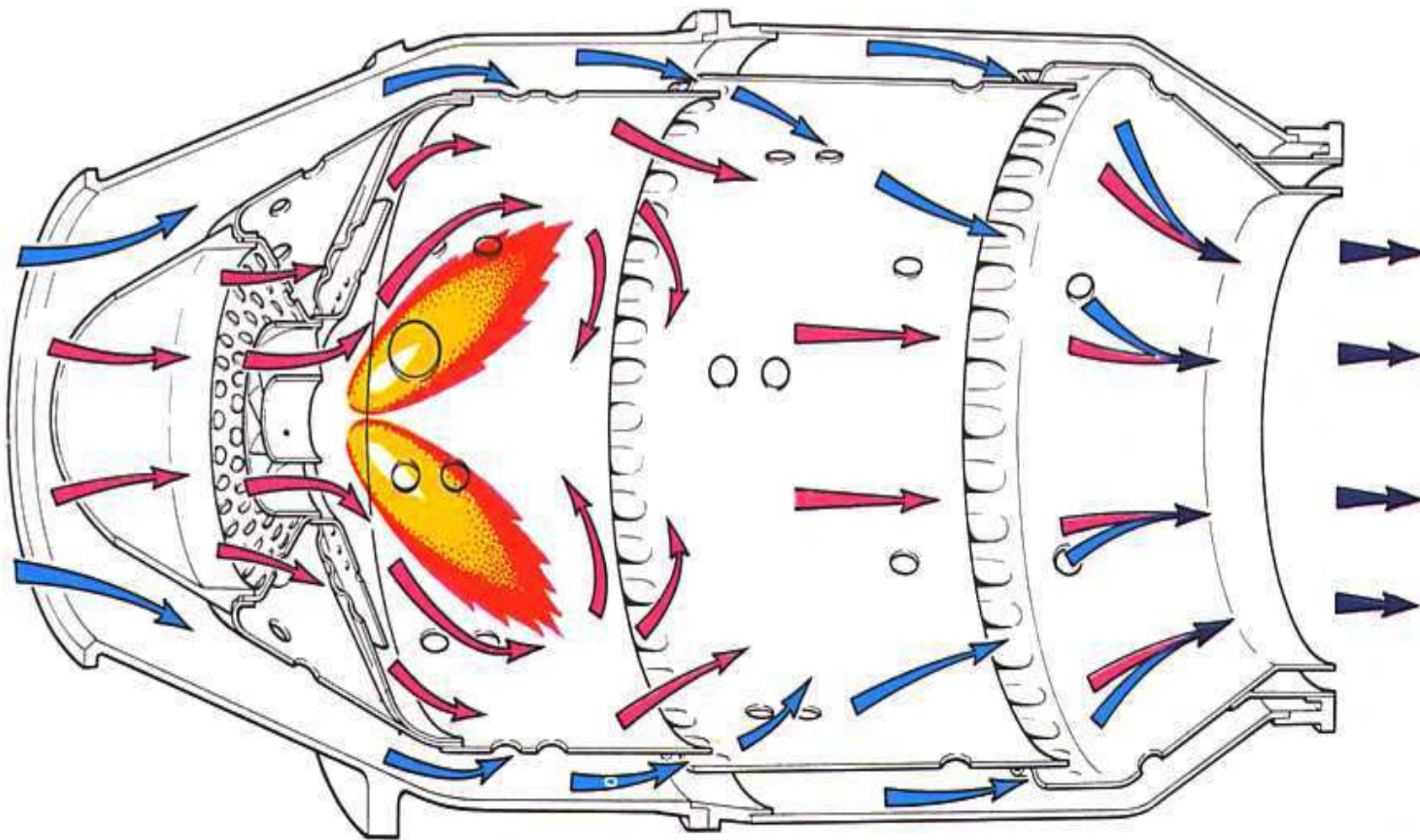
Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

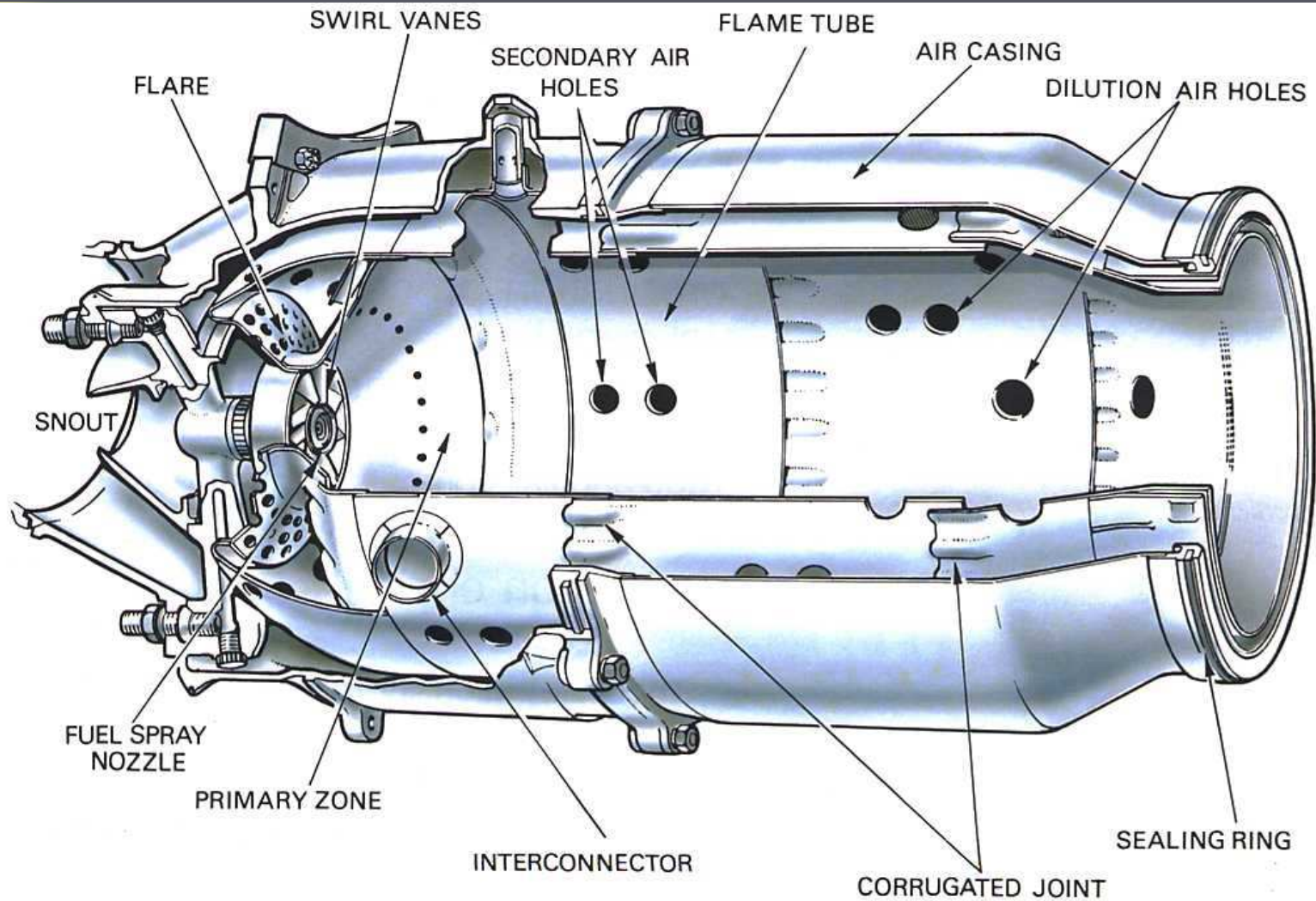
Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

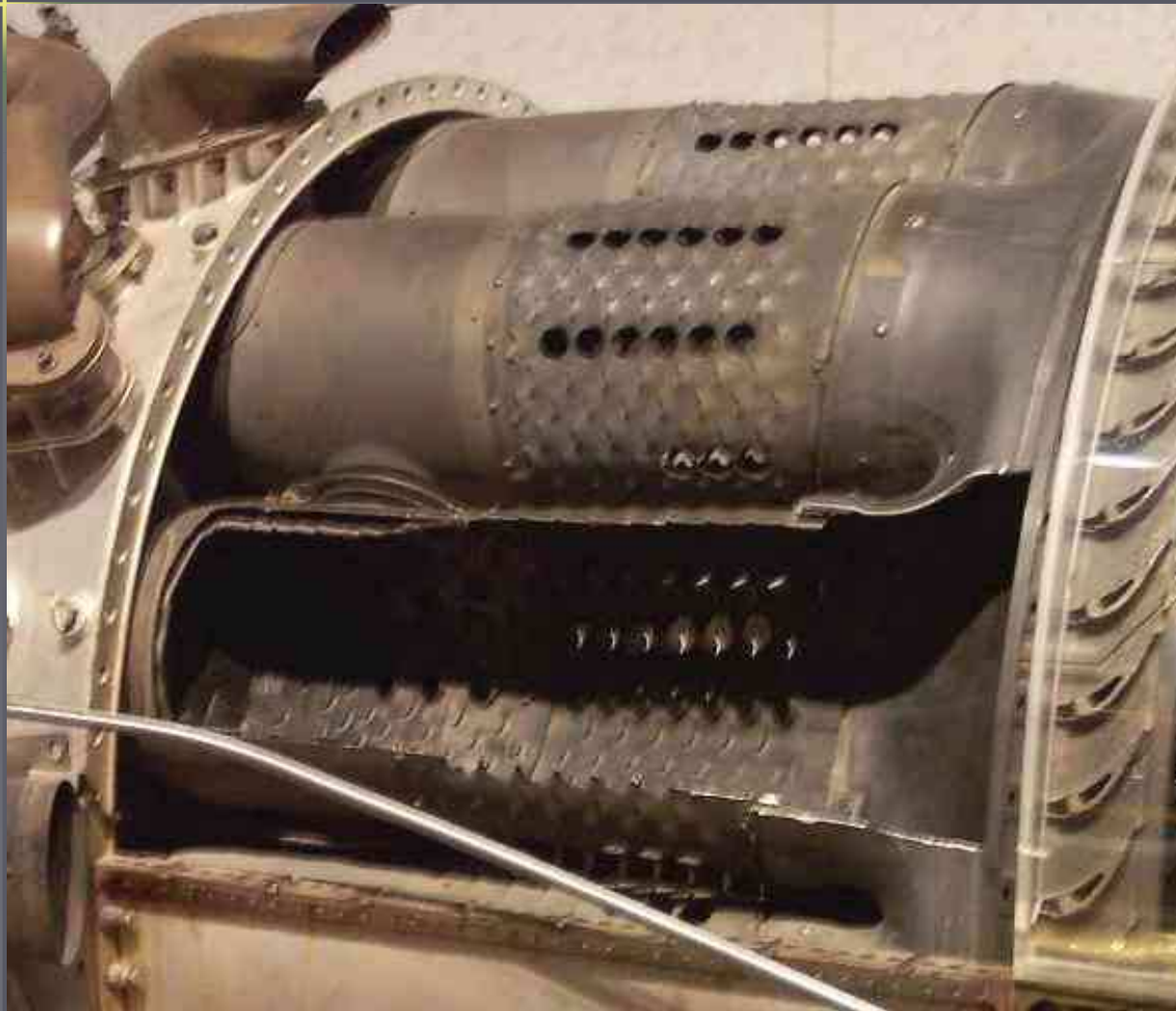
Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- W dopalaczach i silnikach strumieniowych dopuszczalna temperatura wynosi $1400 \div 2200$ [K].
- W związku z tym strumień powietrza nie musi być dzielony na pierwotny wtórny. Współczynnik nadmiaru powietrza wynosi wówczas $\lambda = 1 \div 3$.

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- Model spalania w silnikach waporowych można ograniczyć do spalania pojedynczej dawki paliwa.
- Proces spalania okresowego można podzielić na trzy etapy:
 - zapłon (od rozpoczęcia spalania do pojawienia się płomienia)
 - spalanie właściwe (od pojawienia się płomienia do objęcia płomieniem całej komory spalania lub zakończenia dostarczania paliwa do komory spalania)
 - dopalanie

Spalanie

Przy spalaniu w silnikach wporowych czynnikami decydującymi o przebiegu spalania są:

- sposób zapalenia paliwa
- zmiana temperatury podczas spalania
- dokładność wymieszania paliwa z powietrzem
- dostępność tlenu podczas spalania.

Spalanie

Mieszanka paliwowo-powietrzna może być zapalona:

- punktowo
- objętościowo (wielopunktowo).

Spalanie

- Przy zapłonie punktowym płomień rozchodzi się od miejsca zapłonu po całej komorze spalania.
- Zapłon punktowy dotyczy silników ZI i wymaga istnienia mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Reakcje przedpłomieniowe nie mają istotnego znaczenia przy zapłonie punktowym.

Spalanie

- Dla zapłonu punktowego istnieje minimalna masa mieszanki paliwowo-powietrznej nazywana masą krytyczną, do której należy doprowadzić energię większą od energii zapłonu, aby nastąpiło pojawienie się płomienia.
- Płomień nie pojawi się, jeśli masa mieszanki objęta zapłonem będzie za mała lub będzie zbyt mała energia doprowadzona do obszaru zapłonu w danych warunkach.

Spalanie

- Przy zapłonie iskrowym iskrą elektryczną masę krytyczną można określić przy pomocy odległości wygaszania l_g .
- Odległość wygaszania określa minimalną odległość elektrod w świecy zapłonowej, przy której możliwy jest zapłon.
- Dla elektrody o średnicy 1 [mm] przy płaskim zakończeniu odległość wygaszania wynosi $l_g = 0,6$ [mm].

Spalanie

- Energia zapłonu dla stechiometrycznej mieszanki benzynowo-powietrznej jest rzędu 10^{-3} [J].
- Energia wyładowania w świecy zapłonowej jest 100 razy większa (0,1 [J]).

Spalanie

Dla zapłonu elektrycznego przy $I > I_g$ energia zapłonu będzie zależała od

- składu mieszanki paliwowo-powietrznej – dla składu stechiometrycznego minimalna energia zapłonu
- temperatury – dla $t > 0$ [°C] wpływ nieznaczny; dla $t < 0$ [°C] energia zapłonu rośnie przy spadku temperatury
- zawartości tlenu w powietrzu – energia zapłonu rośnie przy spadku zawartości tlenu
- ciśnienia – energia zapłonu rośnie przy spadku ciśnienia
- prędkości przepływu (ruchu) mieszanki paliwowo-powietrznej – energia zapłonu rośnie przy zwiększeniu prędkości ruchu mieszanki paliwowo-powietrznej

Spalanie

- Zapłon objętościowy zależy od przebiegu reakcji przedpłomieniowych.
- Jeśli reakcje przedpłomieniowe przejdą w reakcje płomieniowe, to proces ten zajdzie jednocześnie w wielu miejscach i wywoła zapłon objętościowy.
- Przejście do reakcji płomieniowych będzie samozapłonem mieszanki paliwowo-powietrznej.

Spalanie

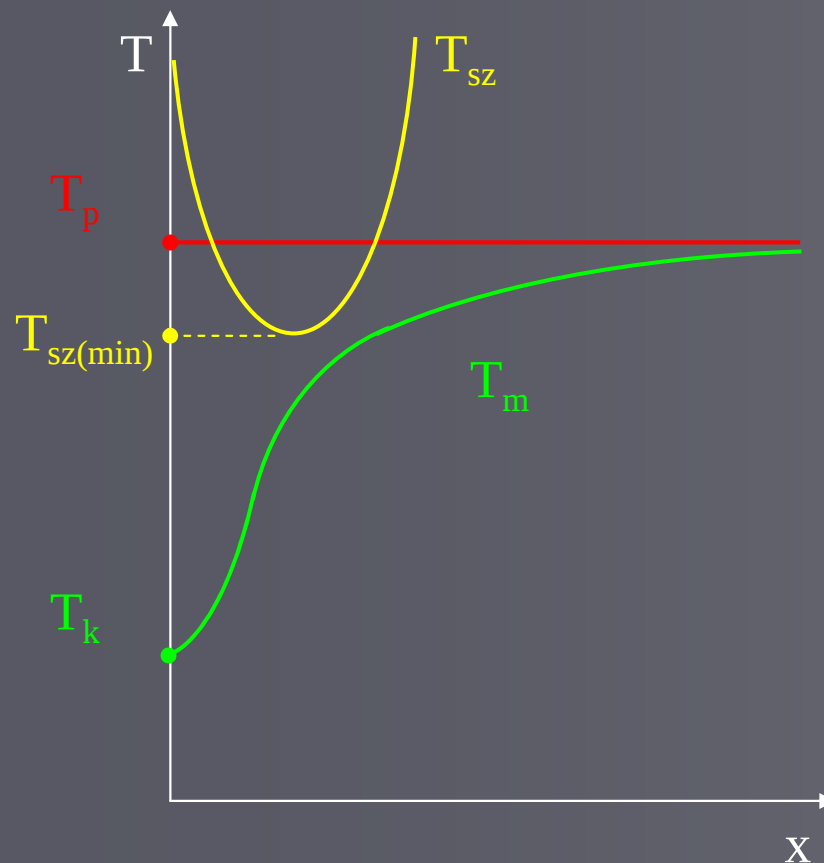
- Zapłon objętościowy dotyczy silników ZS, w których paliwo mieszane jest z powietrzem w postaci kropli cieczy.
- Dla dobrze rozpylonego paliwa przy stechiometrycznym składzie mieszanki paliwowo-powietrznej odległość między kroplami o średnicy 0,04 [mm] wynosi około 0,65 [mm].
- Model pojedynczej parującej kropli w takim przypadku dobrze oddaje mechanizm samozapłonu.

Spalanie

- Na samozapłon pojedynczej kropli paliwa wpływają następujące procesy:
- parowanie kropli
 - dyfuzja par paliwa (mieszanie par paliwa z powietrzem)
 - reakcje przedpłomieniowe.

Spalanie

Termodynamika techniczna



T_k – temperatura kropli paliwa
 T_m – temperatura mieszanki
paliwowo-powietrznej
 T_{sz} – temperatura samozapłonu
 $T_{sz(min)}$ – minimalna temperatura
Samozapłonu
 x – odległość o powierzchni
kropli

Spalanie

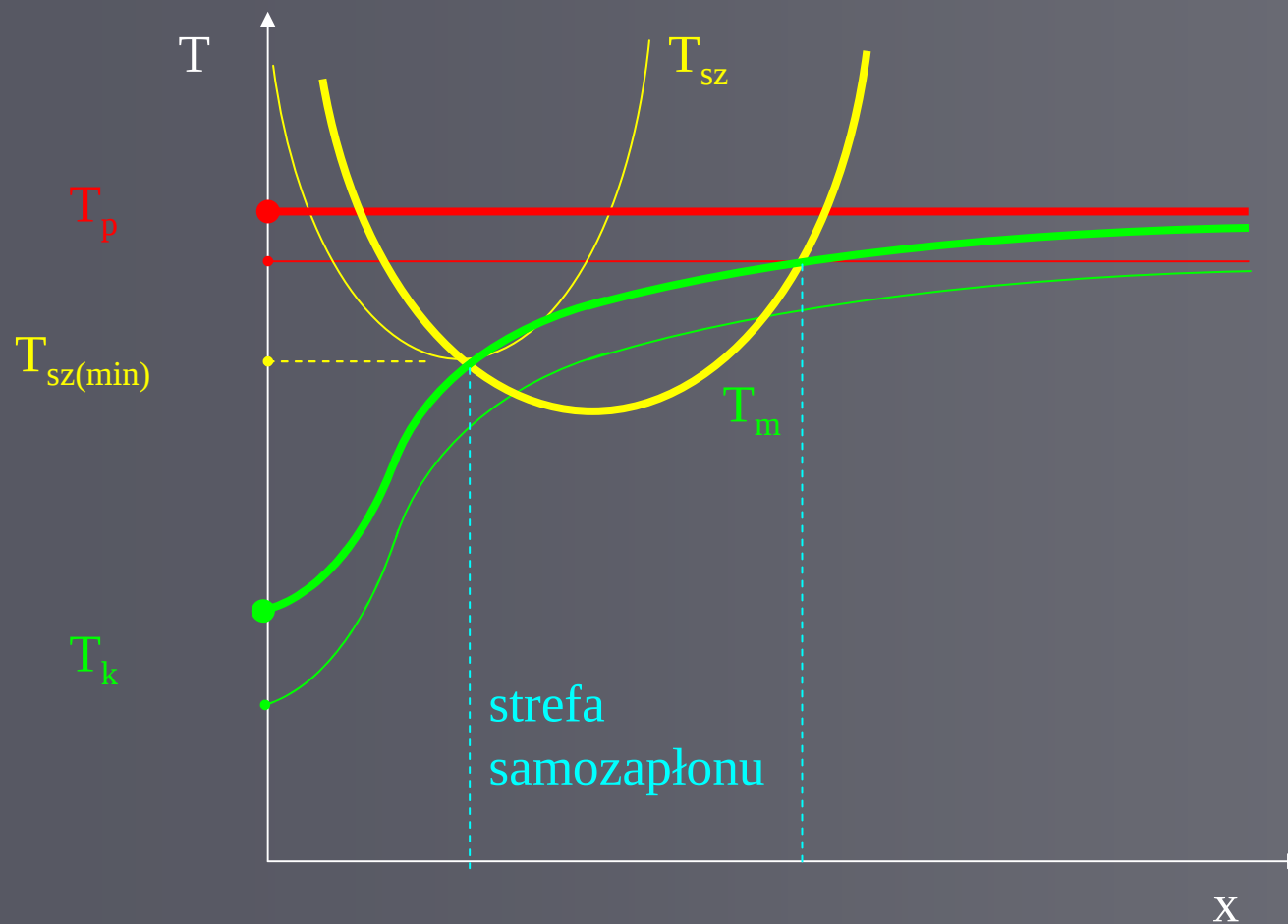
Wzrost temperatury powietrza wywołuje następujące zmiany wpływające na występowanie samozapłonu:

- wzrost temperatury paliwa (paliwo ogrzewa się od powietrza)
- wzrost intensywności parowania (mieszanka palna znajduje się dalej od powierzchni kropli i zajmuje większy obszar)
- minimalna temperatura samozapłonu obniża się (zmienia się przebieg reakcji przedpłomieniowych)

w12

Spalanie

Termodynamika techniczna



Spalanie

- Szczególnym przypadkiem samozapłonu jest zapłon od gorącej ścianki nazywany zapłonem żarowym lub zapłonem powierzchniowy.
- Zapłon powierzchniowy posiada cechy pośrednie między zapłonem punktowym (iskrowym), a zapłonem objętościowym (samoczynnym).

Spalanie

Cechami charakterystycznymi zapłonu powierzchniowego są:

- intensywne dostarczanie ciepła od ścianki do mieszanki paliwowo-powietrznej (podobieństwo do zapłonu punktowego)
- wysokotemperaturowe reakcje przedpłomieniowe.

Spalanie

- Nie chłodzone elementy konstrukcyjne komory spalania ułatwiają uzyskanie zapłonu żarowego.
- Katalityczne własności powierzchni ścianki utrudniają występowanie zapłonu żarowego.

Spalanie

- Przyśpieszone katalitycznie reakcje przedpłomieniowe przebiegają w bardzo cienkiej warstwie przyściennej mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Ciepło wydzielone w tych reakcjach jest pochłaniane przez ściankę, a powstałe produkty spalania oddzielają pozostałą mieszankę paliwowo-powietrzną od ścianki.
- Pokrycie elektrod świecy zapłonowej platyna zapobiega zapłonowi żarowemu do temperatury 1200 [°C].