

## 9. SPALANIE PALIW STAŁYCH

Określenie paliwa stałe odnosi się do wszystkich substancji w stanie stałym, które są zdolne do wywiązywania energii cieplnej w warunkach, jakie występują w komorach spalania silników i urządzeń energetycznych.

### 9.1. Spalanie węgla naturalnego

Węgiel naturalny jest mieszaniną węgla bezpostaciowego oraz różnych organicznych związków chemicznych powstałych w wyniku uwęglania, czyli rozkładu materiału roślinnego bez dostępu powietrza. Najstarszym geologicznie węglem o największej zawartości pierwiastka C jest antracyt, najmłodszym torf. Pośrednie miejsca zajmują: węgiel kamienny (74—79% C) oraz młodszy, mniej uwęglony węgiel brunatny (55—75% C). Dodatkowo węgiel naturalny zawiera wilgoć oraz mineralne składniki, które nie spalają się tj. popioły.

#### 9.1.1. Spalanie pojedynczego ziarna węgla naturalnego

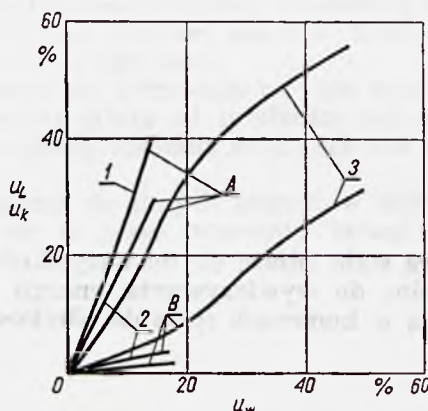
Podczas ogrzewania węgla naturalnego następuje odparowanie wilgoci, a następnie wydzielanie części lotnych. Po odparowaniu i odgazowaniu pozostaje koks, który ma porowatą strukturę i składa się głównie z chemicznie czystego węgla i popiołu.

W czasie spalania najpierw zapalają się części lotne, a dopiero po osiągnięciu odpowiednio wysokiego poziomu temperatury, koks.

Przebieg wypalania się części lotnych i koksu w początkowym stadium procesu dla węgla kamiennego i brunatnego oraz torfu został przedstawiony na rys. 9.1. Wynika z niego zasadniczy wniosek, że choć koks i części lotne palą się jednocześnie to jednak szybkość wypalania się części lotnych jest w początkowym stadium spalania znacznie większa niż koksu. Zjawisko to występuje tym silniej im rozmiar palącej się cząstki paliwa jest mniejszy. Przy cząstkach bardzo małych, poniżej 200  $\mu$ , w początkowym stadium procesu palą się wyłącznie części lotne.

Spalanie chemicznie czystego węgla lub koksu jest typowym procesem heterogenicznym określonym kinetyką reakcji chemicznej przebiegającej w warstwie adsorpcyjnej na powierzchni węgla oraz dyfuzją tlenku z otoczenia do tej powierzchni. Produktami reakcji są jednocześnie

CO i CO<sub>2</sub>, które desorbują z warstwy adsorpcyjnej w otoczenie gazowe. CO reaguje tam z tlenem na CO<sub>2</sub>. Pewna ilość cząstek CO i CO<sub>2</sub> jest jednak po raz wtórny zaadsorbowana przez powierzchnię reakcji, przy czym CO<sub>2</sub> może wtedy przejść w CO.



Rys. 9.1. Przebieg wypalania się części lotnych i koksu w początkowym stadium procesu spalania: A — części lotne, B — koks; 1 — węgiel kamienny, 2 — węgiel brunatny, 3 — torf,  $u_L$  — udział części lotnych, które zostały spalane,  $u_K$  — udział koksu, który został spalony,  $u_W$  — udział paliwa, które zostało spalane

Proces spalania sferycznej cząstki węgla opisuje równanie

$$d \left( \rho_c \frac{\pi d^3}{6} \right) = -K_s \pi d^2 d\tau \quad [9.1]$$

gdzie:  $d$  — średnica cząstki,

$\rho_c$  — gęstość węgla,

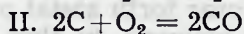
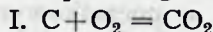
$K_s$  — jednostkowa szybkość spalania,  $\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$ .

Po przekształceniu równanie [9.1] przyjmuje następującą postać

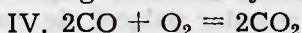
$$\frac{d(d)}{d\tau} = - \frac{2K_s}{\rho_c} \quad [9.2]$$

W celu zcałkowania tego równania należy w nim określić  $K_s$ , co stanowi jeden z głównych problemów teorii spalania węgla.

W celu ujawnienia prawidłowości procesu można przyjąć dla uproszczenia, że reagująca cząstka węgla jest pozbawiona porów. Powstanie CO<sub>2</sub> i CO przebiega zgodnie z następującymi heterogenicznymi reakcjami



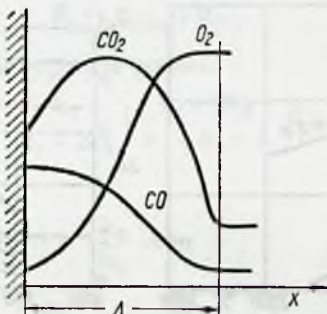
Do tego dochodzi jeszcze homogeniczna reakcja w fazie gazowej



Rozkład CO, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> w pobliżu powierzchni reakcji węgla przedstawiono na rys. 9.2. Bilans strumieni tych składników przechodzących przez jakąś powierzchnię kontrolną określa zależność

$$\frac{1}{2} \frac{dg_{\text{O}_2}}{dx} = - \frac{dg_{\text{CO}_2}}{dx} = \frac{dg_{\text{CO}}}{dx} = -k_4 C_2 \quad [9.3]$$

gdzie:  $g_{O_2}$ ,  $g_{CO_2}$ ,  $g_{CO}$  — strumienie  $O_2$ ,  $CO_2$  i  $CO$ ,  
 $x$  — współrzędna,  
 $C_2$  — koncentracja  $CO$ ,  
 $k_4$  — stała szybkości reakcji IV.



Rys. 9.2. Rozkład koncentracji  $CO_2$ ,  $CO$  i  $O_2$  w pobliżu palącej się powierzchni węgla:  
 $\Delta$  — szerokość warstwy, w której występują gradienty koncentracji

Równanie [9.3] zostało napisane przy założeniu, że wszystkie reakcje w procesie spalania są pierwszego rzędu oraz że ich szybkość jest proporcjonalna do koncentracji  $CO$ .

Przyjmując, że

$$g_{CO} = -D \frac{dC_2}{dx}$$

równanie [9.3] przekształca się

$$D \frac{d^2 C_2}{dx^2} - k_4 C_2 = 0 \quad [9.4]$$

Z zależności [9.4] uzyskuje się ważne kryterium

$$\frac{k_4 \Delta^2}{D} \quad [9.5]$$

gdzie  $\Delta$  — szerokość warstwy, w pobliżu powierzchni reakcji, w której występują gradienty koncentracji (rys. 9.2).

Kryterium to najczęściej stosuje się w postaci

$$\frac{1/k_4 D}{\beta} = Se \quad [9.6]$$

gdyż  $\Delta = D/\beta$

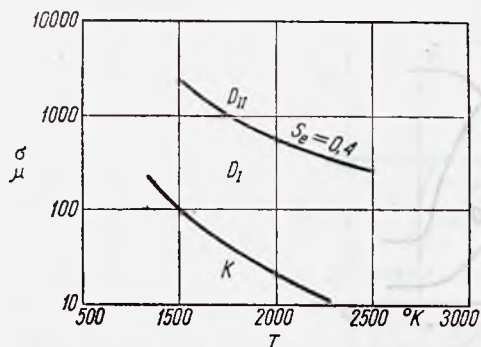
gdzie:  $\beta = ShD/\delta$  — współczynnik wymiany masy,  
 $Sh$  — liczba Sherwooda.

Kryterium [9.6] zostało nazwane liczbą podobieństwa Semienowa.

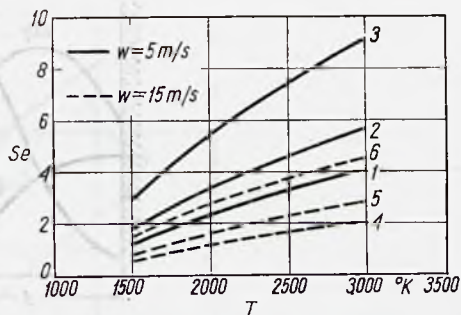
Wartość liczby Semienowa określa wpływ spalania  $CO$  w procesie. Przy dużych wartościach  $Se$  cały tlen zużywa się na spalanie tlenu węgla, który powstaje wtedy wyłącznie z reakcji IV. Przy małych wartościach  $Se$  łączenie się tlenu z  $CO$  w pobliżu powierzchni węgla w ogóle nie zachodzi. Jako wartość graniczną tych dwu przypadków przyjęto  $Se = 0,4$  (rys. 9.3).



Ogólnie na wartość  $Se$  wpływa rozmiar palących się ziaren oraz prędkość czynnika utleniającego względem ziarna (rys. 9.4).  $Se$  zwiększa się ze wzrostem rozmiaru ziarna i spadkiem prędkości przepływu.



Rys. 9.3. Obszary spalania małych cząstek węgla: K — kinetyczny,  $D_I$  — dyfuzyjny bez spalania CO w pobliżu powierzchni reakcji,  $D_{II}$  — dyfuzyjny ze spalaniem CO w pobliżu powierzchni reakcji



Rys. 9.4. Wartości liczb Semienowa w zależności od rozmiaru ziaren  $\delta$  oraz prędkości przepływu  $w$ : 1 —  $\delta = 10$  mm, 2 —  $\delta = 20$  mm, 3 —  $\delta = 50$  mm, 4 —  $\delta = 10$  mm, 5 —  $\delta = 20$  mm, 6 —  $\delta = 50$  mm

W przypadku spalania się małych cząstek (pyłu węglowego)  $Se$  jest mniejsze od 0,4 i reakcja CO z tlenem w pobliżu powierzchni węgla nie występuje. Wtedy strumień tlenu dyfundujący w kierunku powierzchni reakcji określa równanie

$$g_{O_2} = \beta (C_0 - C_{p0}) \quad [9.7]$$

gdzie:  $C_0$  — koncentracja tlenu w otoczeniu,

$C_{p0}$  — koncentracja tlenu w pobliżu powierzchni reakcji.

Na powierzchni węgla zachodzą reakcje I i II, w których zużywa się cały strumień tlenu  $g_{O_2}$

$$g_{O_2} = (k_1 + k_2) C_{p0} \quad [9.8]$$

gdzie  $k_1$  i  $k_2$  — stałe szybkości reakcji I i II.

Łącząc równanie [9.7] i [9.8] otrzymuje się

$$C_{p0} = \frac{\beta}{k_1 + k_2 + \beta} C_0 \quad [9.10]$$

oraz

$$g_{O_2} = \frac{(k_1 + k_2)}{k_1 + k_2 + \beta} C_0 \quad [9.11]$$

W podobny sposób można określić strumienie  $CO_2$  i CO

$$g_{CO_2} = \beta (C_{1p0} - C_1) = k_1 C_{p0} - k_3 C_{1p0} \quad [9.12]$$

$$g_{CO} = \beta C_{2p0} = 2k_2 C_{p0} + 2k_3 C_{1p0} \quad [9.13]$$

gdzie:  $C_{1p0}$ ,  $C_{2p0}$  — koncentracje  $CO_2$  i CO w pobliżu powierzchni reakcji,  
 $C_1$  — koncentracja  $CO_2$  w otoczeniu.

Zużywanie się węgla podczas spalania w ostatecznym rozrachunku określają reakcje  $C + O_2 = CO_2$  i  $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ . Stąd otrzymuje się zależność na jednostkową szybkość spalania

$$K = g_{CO_2} + g_{CO} \quad [9.14]$$

która po przekształceniu przyjmuje postać

$$K_s = \left(1 + \frac{k_3}{k_3 + \beta} \frac{k_1}{k_1 + 2k_2}\right) \frac{k_1 + 2k_2}{k_1 + k_2 + \beta} \beta C_0 + \frac{k}{k_3 + \beta} \beta C_1 \quad [9.15]$$

Oznaczając:  $k_1 + k_2 = k$

$$\frac{k_2}{k_1} = m$$

$$\frac{m}{1+m} = \frac{k_2}{k_1 + k_2} = \xi$$

z równania [9.15] otrzymuje się (przy  $C_1 \rightarrow 0$ )

$$K_s = \frac{2k_3 + (1+\xi)}{k_3 + \beta} \frac{k\beta}{k + \beta} C_0 \quad [9.16]$$

Jeśli jedynym produktem reakcji jest  $CO_2$  wtedy  $\xi = 0$ . Przy spalaniu węgla tylko na  $CO$ ,  $\xi = 1$ .

W przypadku małych  $k_3$  równanie [9.16] przekształca się w postać uproszczoną

$$K_s = (1+\xi) \frac{k\beta}{k + \beta} C_0 \quad [9.17]$$

Wyrażenie  $\frac{k\beta}{k + \beta}$  spełnia funkcję stałej prędkości reakcji.

Gdy  $K \ll \beta$ ,  $\frac{k\beta}{k + \beta} \approx K$ . Jest to przypadek, gdy reakcje na powierzchni węgla zachodzą tak wolno, że decydują o szybkości przebiegu całego procesu. Wtedy spalanie znajduje się w obszarze kinetycznym.

W drugim przypadku, gdy  $k \gg \beta$  i  $\frac{k\beta}{k + \beta} \approx \beta$ . Jest to przypadek, gdy proces kontroluje szybkość dyfuzji tlenu z otoczenia do powierzchni węgla. Wtedy spalanie znajduje się w obszarze dyfuzyjnym.

W obszarze kinetycznym  $C_{p0} \approx C_0$ , a w dyfuzyjnym  $C_{p0} \approx 0$  (rys. 9.5).

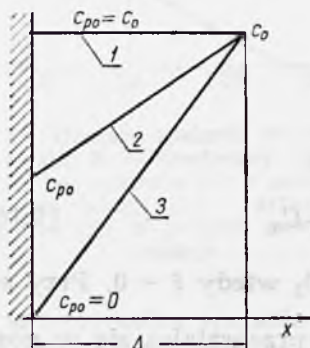
Podczas spalania dużych ziaren węgla w wysokiej temperaturze (co odpowiada dużej wartości liczby Semienowa) istotne zadanie w przebiegu procesu spełnia spalanie  $CO$  w warstwie przyściennej. Analiza zjawiska znacznie się upraszcza jeśli się przyjmie, że reakcja  $CO$  z tlenem zachodzi w nieskończenie cienkiej warstwie (rys. 9.6). Powstający w tym procesie strumień  $CO_2$  jest równy strumieniowi  $O_2$  dyfundującemu w kierunku strefy reakcji. Wynika to z równania stechiometrycznego  $C + O_2 = CO_2$ , w którym na 1 kmol  $CO_2$  przypada również 1 kmol  $O_2$ .

Stąd otrzymuje się

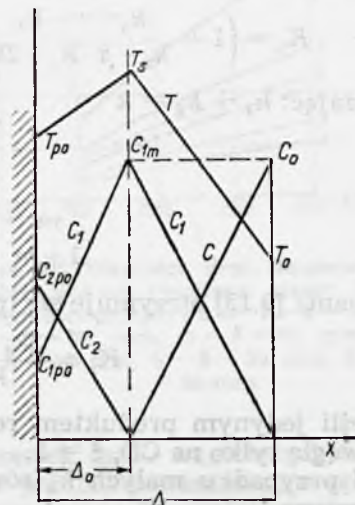
$$D \frac{C_0}{\Delta - \Delta_0} = D \frac{C_{1m}}{\Delta - \Delta_0} \quad \text{oraz} \quad C_0 = C_{1m} \quad [9.18]$$

gdzie:  $C_0$  — koncentracja tlenu w otoczeniu,  
 $C_{1m}$  — maksymalna koncentracja  $\text{CO}_2$ ,  
 $\Delta$  — szerokość warstwy przyściennej,  
 $\Delta_0$  — odległość strefy reakcji  $\text{CO}$  z  $\text{O}_2$  od powierzchni węgla,  
 $D$  — stała dyfuzji (taka sama dla wszystkich składników biorących udział w procesie).

Przy ustalaniu równości [9.18] przyjęto, że koncentracja  $\text{CO}_2$  w otoczeniu równa się zeru ( $C_{1m} = 0$ ).



Rys. 9.5. Rozkład koncentracji tlenu w pobliżu powierzchni reakcji, gdy nie zachodzi spalanie  $\text{CO}$ : 1 — obszar kinetyczny, 2 — obszar dyfuzyjny, 3 — obszar przejściowy



Rys. 9.6. Rozkład koncentracji gazów oraz temperatury w warstwie przyściennej palącego się węgla w przypadku reakcji  $\text{CO}$  z tlenem:  $\Delta$  — szerokość warstwy przyściennej,  $\Delta_0$  — odległość powierzchni reakcji tlenu z  $\text{CO}$ ,  $C$  — koncentracja tlenu,  $C_1$  — koncentracja  $\text{CO}_2$ ,  $C_2$  — koncentracja  $\text{CO}$ ,  $T_s$  — temperatura na powierzchni reakcji  $\text{CO}$  z tlenem,  $T_{p0}$  — temperatura warstwy adsorpcyjnej,  $T_0$  — temperatura otoczenia

Strumienie  $\text{CO}_2$  i  $\text{CO}$  określają zależności

$$g_{\text{CO}_2} = D \frac{C_0 - C_{1p0}}{\Delta_0} = k_3 C_{1p0} \quad [9.19]$$

$$g_{\text{CO}} = D \frac{C_{2p0}}{\Delta_0} = 2k_3 C_{1p0} \quad [9.20]$$

stąd

$$C_{1p0} = \frac{\frac{D}{\Delta_0 k_3}}{1 + \frac{D}{\Delta_0 k_3}} C_0 \quad [9.21]$$

$$C_{2p0} = \frac{2}{1 + \frac{D}{\Delta_0 k_3}} C_0 \quad [9.22]$$



Strumień tlenu węgla, zgodnie z równaniem stechiometrycznym  $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}_2$ , powinien być dwa razy większy od strumienia tlenu. Dlatego

$$2k_3 C_{1p0} = 2D \frac{C_0}{\Delta - \Delta_0} \quad [9.23]$$

Wstawiając to równanie w zależność na  $C_{1p0}$  oraz uwzględniając że

$$\frac{D}{\Delta} = \beta$$

otrzymuje się

$$\Delta_0 = \frac{1}{2} \left( \Delta - \frac{D}{k_3} \right) \quad [9.24]$$

oraz

$$\frac{\Delta_0}{\Delta} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\beta}{k_3} \right) \quad [9.25]$$

Z równań [9.19], [9.21] i [9.25] wynika

$$g_{\text{CO}_2} = 2 \frac{k_3 \beta}{k_3 + \beta} C_0 \quad [9.26]$$

Ponieważ strumień  $\text{CO}_2$  równa się jednostkowej szybkości spalania węgla (w równaniu stechiometrycznym  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ , na 1 kmol  $\text{CO}_2$  przypada 1 kmol C) więc ostatecznie otrzymuje się

$$K_s = 2 \frac{k_3 \beta}{k_3 + \beta} C_0 \quad [9.27]$$

W obszarze dyfuzyjnym równanie [9.27] przyjmie postać

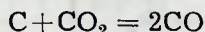
$$K_s = 2\beta C_0 \quad [9.28]$$

Wtedy odległość powierzchni reakcji CO z  $\text{O}_2$  od powierzchni węgla równa się połowie szerokości warstwy przyściennej (równanie [9.25])

$$\Delta_0 = \frac{1}{2} \Delta$$

Tłumaczy to, dlaczego prędkość spalania węgla w obszarze dyfuzyjnym jest dwa razy większa, gdy w warstwie powierzchniowej zachodzi reakcja tlenu z tlenkiem węgla, niż wtedy, gdy spalanie na  $\text{CO}_2$  występuje od razu w warstwie adsorpcyjnej.

Rozkład temperatury w warstwie przyściennej przedstawiono na rys. 9.6. Reakcja



ma charakter endotermiczny i dlatego temperatura na powierzchni węgla jest niższa od panującej w miejscu, gdzie zachodzi spalanie CO na  $\text{CO}_2$ .

Strumień ciepły skierowany do powierzchni węgla wynosi

$$\lambda \frac{T_s - T_{p0}}{\Delta_0} = q' g_{\text{CO}_2} = q' D \frac{C_0 - C_{1p0}}{\Delta_0} \quad [9.29]$$

gdzie:  $\lambda$  — współczynnik przewodzenia ciepła przyjęty dla średniej temperatury panującej w warstwie przyściennej,  
 $T_s$  — temperatura na powierzchni reakcji CO z O<sub>2</sub>,  
 $T_{p0}$  — temperatura na powierzchni węgla,  
 $q' = 172000$  kJ/kmol — ciepło spalania CO,  
 Podstawiając w równaniu [9.29] zależności [9.21] i [9.25] otrzymuje się

$$Le (T_s - T_{i0}) = \frac{q'}{C_p \rho} \frac{k_3 - \beta}{k_3 + \beta} C \quad [9.30]$$

gdzie:  $Le = \frac{\lambda}{DC_p \rho}$  — liczba podobieństwa Lewisa,  
 $\rho$  — gęstość gazu,  
 $C_p$  — ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu.

Strumień ciepły przekazywany otoczeniu wynosi

$$\lambda \frac{T_s - T_0}{\Delta - \Delta_0} = qg_{O_2} = qD \frac{C}{\Delta - \Delta_0} \quad [9.31]$$

gdzie  $q = 395\,000$  kJ/kmol — ciepło spalania węgla.

Stąd dostaje się

$$T_s - T_0 + \frac{T_i - T_0}{Le} \quad [9.32]$$

gdzie  $T_i$  — teoretyczna temperatura spalania.

Podstawiając wartość  $T_s$  do [9.30] i uwzględniając, że

$$k_3 = k_3(T_{p0}) = k_{30} e^{-\frac{E}{RT_{p0}}} \quad [9.33]$$

gdzie:  $E$  — energia aktywacji,  
 $R$  — stała gazowa,

otrzymuje się zależność na temperaturę powierzchni reakcji węgla

$$T_{p0} = \frac{1}{Le} [T_i + (Le - 1) T_0] - \frac{1}{Le} \frac{q}{C_p \rho} \frac{k_3(T_{p0}) - \beta}{k_3(T_{p0}) + \beta} C \quad [9.34]$$

Przy założeniu, że  $Le = 1$  i  $T_i = T_s$  z równania [9.34] uzyskuje się

$$T_{p0} = T_s - \frac{q}{C_p \rho} \frac{k_3(T_{p0}) - \beta}{k_3(T_{p0}) + \beta} C \quad [9.35]$$

Jeśli  $\beta/k_3 \rightarrow 1$  wtedy  $T_{p0} \rightarrow T_s$  i  $\Delta_0 \rightarrow 0$ .

Warunkiem koniecznym do tego, aby w warstwie przyściennej zachodziła reakcja CO z O<sub>2</sub> (czyli, żeby proces spalania został rozłożony na dwie reakcje: pierwotną w warstwie adsorpcyjnej i wtórną w warstwie przyściennej) musi być spełniony warunek

$$\frac{\beta}{k_3} < 1$$

Oznacza to, że przy niskich wartościach  $k_3$  reakcja na powierzchni węgla nie jest w stanie dostarczyć odpowiedniej ilości CO potrzebnej do związania tlenu dyfundującego z otoczenia.

Rzeczywiste ziarna węgla mają strukturę porowatą. W związku z tym spalanie występuje również wewnątrz ziarna na powierzchni porów (rys. 9.7). I tu także, w zależności od warunków, proces zachodzi w obszarze kinetycznym lub dyfuzyjnym.



W niskich temperaturach, gdy szybkość dyfuzji w porach znacznie przewyższa szybkość reakcji chemicznej, spalanie przebiega w całej objętości ziarna. Proces znajduje się wtedy w obszarze „wewnętrzny, kinetyczny”.



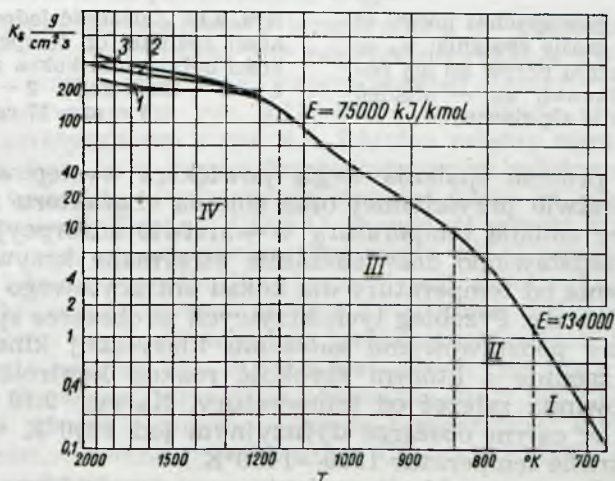
Rys. 9.7. Schemat spalania węgla w porach

Ze wzrostem temperatury szybkość reakcji chemicznej zaczyna stopniowo przewyższać szybkość dyfuzji wewnątrz porów. Koncentracja tlenu na powierzchni ziarna jest równa w przybliżeniu jego koncentracji w otoczeniu. Wewnątrz porów natomiast koncentracja ta, w miarę oddalania się od powierzchni, maleje aż do zera. Głębokość wewnętrznego spalania staje się wtedy wielkością zmienną, zależną od szybkości dyfuzji w porach i szybkości reakcji na ich powierzchni, a proces znajduje się w obszarze „wewnętrzny dyfuzyjny”.

Przy dalszym wzroście temperatury szybkość reakcji chemicznej jest tak duża, że staje się nieporównywalna z szybkością dyfuzji wewnętrznej i spalanie w porach praktycznie już nie występuje. Nie przeszkadza to jednak, że na zewnątrz ziarna szybkość dyfuzji może być jeszcze większa od szybkości reakcji chemicznej na jego powierzchni i proces znajduje się w obszarze „zewnętrzny kinetyczny”.

W bardzo wysokich temperaturach szybkość reakcji chemicznej jest taka wielka, że kontrolę nad spalaniem przejmuje całkowicie dyfuzja. Proces znajduje się wtedy w obszarze „zewnętrzny, dyfuzyjny”.

Opisane zjawiska zostały przedstawione na wykresie rys. 9.8, który podaje zależność jednostkowej szybkości spalania węgla od temperatury

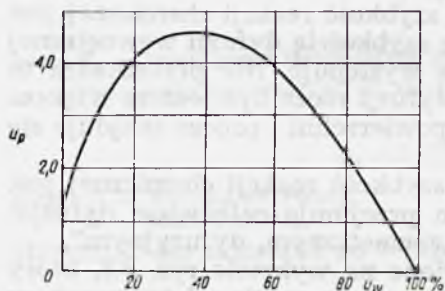


Rys. 9.8. Spalanie koksu antracytowego: I — obszar wewnętrzny kinetyczny, II — obszar wewnętrzny dyfuzyjny, III — obszar zewnętrzny kinetyczny, IV — obszar zewnętrzny dyfuzyjny, 1 —  $w = 0,2$  m/s, 2 —  $w = 0,6$  m/s, 3 —  $w = 1,0$  m/s, E — energia aktywacji

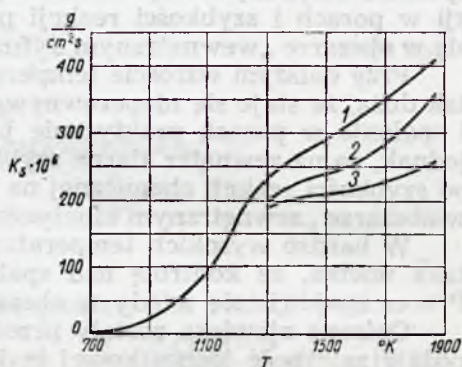
i na który naniesiono cztery wyszczególnione poprzednio obszary procesu. Kąt pochylenia krzywej w układzie współrzędnych  $\lg K_s - 1/T$  określa wartość energii aktywacji. Na krzywej widać dwa przegięcia charakteryzujące przejście spalania ze strefy niskich temperatur do średnich, a potem do wysokich. Pierwsze przegięcie występuje w temperaturze około  $800^\circ\text{K}$  i odpowiada obszarowi „wewnętrznemu dyfuzyjnemu”. Poniżej tej temperatury spalanie znajduje się w obszarze „wewnętrznym kinetycznym”.

Rozwidlenie krzywych w obszarze „zewnątrznym dyfuzyjnym”, który w danym przypadku zaczyna się w temperaturze nieco niższej od  $1200^\circ\text{K}$  jest spowodowane różną prędkością opływu ziaren przez czynnik utleniający. Zwiększenie prędkości przepływu uintensyfikuje dyfuzję, a ta z kolei — szybkość spalania.

Na szybkość spalania i wartość energii aktywacji ma duży wpływ struktura ziarna i jego porowatość. Porowatość, a tym samym wewnętrzna powierzchnia reakcji zmieniają się jednak w czasie spalania. Początkowo wewnętrzna powierzchnia zwiększa się, osiąga maksimum, a następnie w związku ze zmniejszaniem się masy ziarna jej wartość spada do zera (rys. 9.9).



Rys. 9.9. Zmiana powierzchni porów w czasie spalania:  $u_p$  — stosunek powierzchni porów do ich powierzchni początkowej,  $u_w$  — stopień wypalenia się ziarna



Rys. 9.10. Zależność jednostkowej szybkości spalania od temperatury i prędkości opływu dla koksu antracytowego: 1 —  $w = 100$  cm/s, 2 —  $w = 60$  cm/s, 3 —  $w = 27$  cm/s

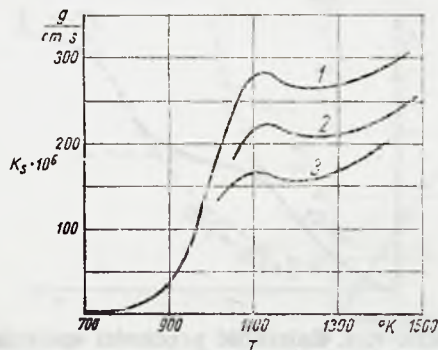
Złożoność procesu spalania węgla powiększa występowanie reakcji wtórnej w warstwie przysiennej oraz zmiana charakteru reakcji pierwotnej wraz ze zmianą temperatury w warstwie adsorpcyjnej. Na rys. 9.10 i 9.11 przedstawiono doświadczalnie otrzymane krzywe zależności szybkości spalania od temperatury dla koksu antracytowego i węgla używanego na elektrody. Przebieg tych krzywych w obszarze spalania dyfuzyjnego przeczy podstawowemu założeniu klasycznej kinetyki reakcji chemicznych, zgodnie z którym szybkość reakcji kontrolowanej przez dyfuzję nie powinna zależeć od temperatury. Na rys. 9.10 ta zależność jest widoczna w całym obszarze dyfuzyjnym (od  $1300^\circ\text{K}$  wzwyż) a na rys. 9.11 w zakresie temperatur  $1300$ — $1450^\circ\text{K}$ .

Istotny wpływ na szybkość spalania węgla ma wtórna reakcja  $\text{CO}$  z  $\text{O}_2$ , której przebieg z kolei zależy od prędkości i charakteru opływu palącego się ziarna przez czynnik otaczający (rys. 9.12). Przy bardzo małych prędkościach opływu (mniejszych od  $0,3$  m/s), gdy opływ ma charakter

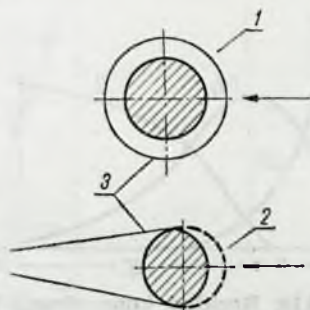


laminarny, wokół ziarna powstaje strefa reakcji wtórnej, a ziarno spala się równomiernie na całej powierzchni.

Przy prędkościach opływu większych od 2 m/s spalanie ziarna jest nierównomierne. Szybciej mianowicie spala się ono od strony napływu powietrza. Strefa reakcji tlenku węgla z tlenem zostaje natomiast prze-



Rys. 9.11. Zależność jednostkowej szybkości od temperatury i prędkości opływu dla węgla elektrodowego: 1 —  $w = 60$  cm/s, 2 —  $w = 27$  cm/s, 3 —  $w = 11$  cm/s



Rys. 9.12. Spalanie kulistego ziarna węgla w zależności od prędkości opływu: 1 — bardzo mała prędkość opływu (0,2 — 0,3 m/s), 2 — duża prędkość opływu ( $> 2$  m/s), 3 — obszar, w którym zachodzi wtórna reakcja CO z  $O_2$

niesiona na stronę przeciwną. Brak intensywnego spalania węgla z tej strony tłumaczy się właśnie zużywaniem całego tlenu przez reagujący z nim tlenek węgla, który w związku z tym nie jest w stanie dotrzeć do warstwy adsorpcyjnej.

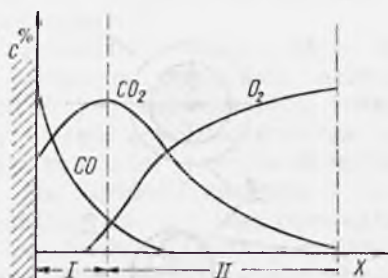
Ujemny wpływ temperatury na szybkość spalania w obszarze temperatur 1100—1300°K występujący w niektórych eksperymentach (rys. 9.11) można również wyjaśnić spalaniem CO, które hamuje bezpośrednio oddziaływanie tlenu na powierzchnię węgla.

Wzrost szybkości spalania z temperaturą w obszarze dyfuzyjnym tłumaczy się przeanalizowaną już poprzednio reakcją dwutlenku węgla w warstwie adsorpcyjnej. Rzeczywisty rozkład koncentracji składników reakcji przedstawiono na rys. 9.13, który odpowiada omówionemu już rozkładowi teoretycznemu z rys. 9.6. Różnica między nimi polega przede wszystkim na tym, że w przypadku teoretycznym założono spalanie tlenu węgla w warstwie nieskończenie cienkiej, która w rzeczywistości ma określoną szerokość. Reakcja CO z  $O_2$  powoduje wzrost koncentracji  $CO_2$  w miarę oddalania się od powierzchni węgla aż do osiągnięcia pewnego maksimum. Istnienie gradientów koncentracji dwutlenku węgla skierowanych w obie strony powoduje jego dwustronną dyfuzję, a więc także i ku powierzchni węgla. W wysokiej temperaturze węgiel reaguje z dwutlenkiem węgla tworząc CO. W tych warunkach tlen nie musi bezpośrednio docierać do węgla, gdyż jego nosicielem staje się  $CO_2$ . Można więc przypuszczać, że na pewnym poziomie temperatury szybkość spalania węgla jest kontrolowana przez reakcję  $CO_2 + C = 2CO$ , która z ubocznej staje się podstawową.

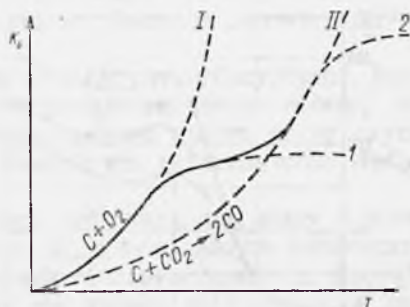
W związku z tym zależność ogólnej prędkości spalania węgla od temperatury można przedstawić, jak na rys. 9.14. W niskich temperaturach proces przebiega w obszarze kinetycznym wg krzywej I reakcji  $C + O_2$



zachodzącej na powierzchni węgla. Poczynając od temperatury rzędu  $1300^{\circ}\text{K}$  proces przechodzi na krzywą 1 obszaru dyfuzyjnego. Jednocześnie zaczyna przyspieszać reakcja  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ , której wpływ w miarę wzrostu temperatury staje się coraz większy, aż spowoduje przejście całego procesu w obszar kinetyczny na krzywą II. W bardzo wysokich tem-



Rys. 9.13. Rozkład koncentracji C gazów biorących udział w spalaniu węgla w wysokiej temperaturze; I — strefa spalania, II — strefa mieszania, x — odległość od powierzchni węgla



Rys. 9.14. Zależność prędkości spalania węgla od temperatury: I — krzywa reakcji  $\text{C} + \text{O}_2$ , II — krzywa reakcji  $\text{C} + \text{CO}_2$ , 1, 2 — krzywa reakcji w obszarach dyfuzyjnych

peraturach istnieje możliwość powtórne przejścia spalania w obszar dyfuzyjny na krzywą 2 co nie zostało jeszcze potwierdzone eksperymentalnie.

Rola składników lotnych węgla naturalnego w procesie spalania zależy, jak już wspomniano na wstępie od rozmiaru palącego się ziarna. Podczas ogrzewania bowiem większych kawałków odgazowanie węgla postępuje w miarę wzrostu temperatury, natomiast podczas ogrzewania pyłu na ogół za wzrostem tym nie nadąża.

W czasie wzrostu spalania pyłu podstawowa masa części lotnych nie zdąży się wydzielić od chwili zapłonu części stałej. Dlatego części lotne spalają się równolegle z pozostałością koksową tworząc wokół niej płomień, w którym dodatkowo dopala się wytworzone na powierzchni węgla CO.

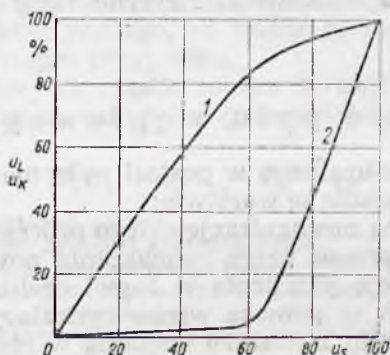
Podczas spalania większych kawałków węgla ich odgazowanie jest zwykle zakończone przed wejściem w reakcję koksu. Proces spalania zapoczątkowuje zapłon części lotnych, które płoną w pobliżu koksu nagrzewają go i aktywizują, ale jednocześnie utrudniają do niego dopływ tlenu. Dlatego właściwa reakcja tlenu z koksem jest możliwa dopiero w końcowym stadium spalania części lotnych (rys. 9.15).

Im większa jest zawartość części lotnych w paliwie tym szybciej kończy się spalanie, gdyż najwolniej przebiegają zawsze heterogeniczne reakcje na powierzchni koksu i one przedłużają proces.

W czasie odgazowywania ziaren węglowych zmieniają się ich rozmiary, które mogą się zwiększać lub zmniejszać ( $+3 \div -10\%$ ). Osobliwością, szczególnie węgla brunatnych, są przypadki eksplozji drobnych ziaren powodowanych intensywnym wydobywaniem się części lotnych.

Pewien wpływ na proces spalania węgla naturalnego mają jego składniki mineralne, tworzące popiół, który po przekroczeniu temperatury właściwej dla danego składu stapia się i tworzy szklistą masę zwaną żużlem.

Popiół w węglu jest równomiernie rozproszony w całej objętości („popiół wewnętrzny” — stanowiący zwykle 1—2% masy węgla), a oprócz tego tworzy w nim wydzielone warstwy o różnej grubości i złożonym kształcie („popiół zewnętrzny”). Popiół zewnętrzny na ogół nie ma wpływu na przebieg spalania drobno zmielonego pyłu, gdyż może wtedy wy-



Rys. 9.15. Szybkość odgazowania i spalania pozostałości koksowej dla węgla brunatnego: 1 —  $u_L = f(u_s)$ , 2 —  $u_k = f(u_s)$ ,  $u_L$  — udział części lotnych, które opuściły paliwo,  $u_k$  — udział pozostałości koksowej, która uległa spalaniu,  $u_s$  — udział paliwa (części lotnych i pozostałości koksowej razem), które uległo spalaniu

stąpić tylko w postaci oddzielnych cząstek. Dopiero po przekroczeniu ~25% udział popiołu w węglu daje się zauważyć jego negatywne oddziaływanie objawiające się wzrostem niespalonych cząstek paliwa w spalinach.

Podczas spalania w palenisku warstwowym wpływ popiołu jest znacznie wyraźniejszy. Już nawet przy bardzo niewielkim udziale popiołu w węglu obserwuje się powstanie na powierzchni płonącego węgla miękkiej powłoki żużla, która przy większych prędkościach przepływu bywa zdmuchiwana tak, że powstaje jedynie cienka warstewka o grubości  $0,2 \div 0,3$  mm.

W przypadku dużej zawartości popiołu w węglu, na jego powierzchni, w zależności od składu popiołu i temperatury procesu, może powstać spieczony, twardy nasłódek lub też ciekła powłoka żużla, które utrudniają dyfuzję tlenu w kierunku powierzchni węgla. Ciekły żużel wpływa w szczeliny między poszczególnymi kawałkami węgla, rozsuwa je i zmniejsza w ten sposób powierzchnię reakcji przypadającą na jednostkę objętości.

Oddziaływanie popiołu na spalanie zależy w znacznym stopniu od tego czy reakcja znajduje się w obszarze kinetycznym czy też dyfuzyjnym.

W wysokiej temperaturze, przy intensywnie przebiegającej reakcji chemicznej, szybkość całego procesu kontroluje dyfuzja tlenu przez warstwę żużla. W tych samych jednak warunkach, gdy warstwa żużla jest cienka o szybkości procesu decyduje dyfuzja w warstwie przyściennej. Dlatego zwiększenie prędkości powietrza wdmuchiwanego przez ruszt może oddziaływać na szybkość spalania tylko w tym drugim przypadku.

W niskich temperaturach, bliskich temperaturze zapłonu paliwa, szybkość spalania jest określona kinetyką reakcji chemicznych. Z tego powodu obecność żużla nie ma wpływu na przebieg spalania z wyjątkiem tych przypadków, gdy któryś z jego składników działa katalitycz-



nie. Ten rodzaj procesu występuje podczas dopalania się ziaren reszty koksowej w żużlu w dolnych warstwach paleniska rusztowego lub też w końcowym stadium spalania się pyłu w żagwi w ekranowanym palenisku komorowym.

W analizie wpływu popiołu na przebieg procesu spalania należy brać także pod uwagę jego właściwości fizyczne takie jak porowatość, spiekalność i topliwość.

### 9.1.2. Spalanie pyłu węglowego w żagwi

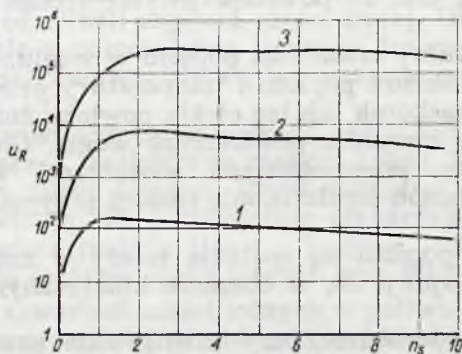
Spalanie węgla naturalnego w postaci pyłu ma co najmniej dwie zalety w stosunku do spalania w warstwie:

- umożliwia pełną mechanizację całego procesu,
- intensyfikuje proces przez zwiększenie powierzchni reakcji.

Zapłon i stabilizację płomienia w żagwi realizuje się podobnie, jak w innych przypadkach za pomocą wirów cyrkulacyjnych, które przenoszą część gorących spalin z obszaru spalania w obszar zapłonu. Wiry te tworzy się przez nagłe rozszerzenie kanału, którym przepływa struga mieszanki pyłu z powietrzem, przez wprowadzenie jej w ruch obrotowy lub wstawienie w nią ciała nieopływowego.

Podczas spalania węgla, o czym już była mowa poprzednio, powstaje i najpierw się spala mieszanka części lotnych z powietrzem. W przypadku węgla o małej zawartości części lotnych jest wymagane jego silniejsze, wstępne ogrzanie, aby równocześnie z zapłonem części lotnych mogły wystąpić intensywne reakcje w warstwie adsorpcyjnej podtrzymujące proces.

Dopływ spalin, w wyniku cyrkulacji do strugi świeżej mieszanki pyłu i powietrza, zmniejsza wprowadzie koncentrację składników reakcji ale umożliwia także ich szybkie ogrzanie do odpowiednio wysokiej temperatury. Na rys. 9.16 przedstawiono wpływ dodatku gorących spalin na szyb-



Rys. 9.16. Wpływ dodatku gorących spalin na szybkość reakcji:  $u_R$  — stosunek szybkości reakcji mieszanki z dodatkiem spalin do szybkości reakcji mieszanki bez spalin,  $n_s$  — stosunek mas spalin i mieszanki paliwej,  $E$  — energia aktywacji, 1 —  $E = 41,8$  kJ/kmol, 2 —  $E = 62,7$  kJ/kmol, 3 —  $E = 83,6$  kJ/kmol

kość reakcji trzech różnych mieszanek paliwa z powietrzem określonych przez trzy wartości energii aktywacji. Początkowa temperatura mieszanki wynosi  $475^\circ\text{K}$ , a temperatura spalin  $2075^\circ\text{K}$ . Wpływ dodatku spalin rośnie ze wzrostem energii aktywacji. Maksimum prędkości reakcji osią-



ga się przy stosunku spalin do mieszanki wynoszącym  $1 \div 3$ . Jest interesujące, że po przekroczeniu maksimum, szybkość reakcji spada bardzo powoli, mimo znacznego obniżenia koncentracji.

Temperatura palących się cząstek węgla jest na ogół wyższa od temperatury otaczających gazów. Różnica ta jest większa w obszarze spalania dyfuzyjnego niż kinetycznego, co tłumaczy się intensywniejszą wymianą ciepła w tym drugim przypadku.

Temperaturę palącej się cząstki można określić z bilansu energii: ciepła wywiązanego podczas reakcji i odprowadzonego przez przejmowanie i promieniowanie

$$W_t K_s = \alpha_p (T_{cz} - T_0) + q_R \quad [9.36]$$

gdzie:  $W_t$  — wartość opałowa paliwa,  
 $K_s$  — jednostkowa szybkość spalania węgla,  
 $\alpha_p$  — współczynnik przejmowania ciepła,  
 $T_{cz}$  — temperatura powierzchni cząstki palącego się węgla,  
 $T_0$  — temperatura środowiska,  
 $q_R$  — ciepło odprowadzone przez promieniowanie.

Można przyjąć

$$q_R = \sigma_R (T_{cz}^4 - T_0^4)$$

a także

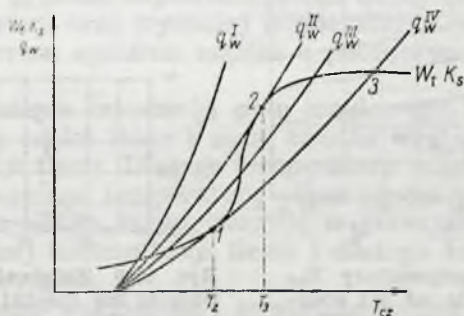
$$q_R = \sigma'_R T_{cz}^4$$

gdzie  $\sigma_R$  i  $\sigma'_R$  — stałe promieniowania.

Stała  $\sigma'_R$  uwzględnia strumień energii promieniowania zwrócony cząstce przez środowisko. W ekranowanym palenisku kotłowym, strumień ciepła zwracany przez ekrany żagwi płonącej mieszanki wynosi 50—60%.

Straty ciepła przez promieniowanie cząstek wewnątrz żagwi są jeszcze mniejsze tak więc, w przypadku płomienia świecącego, można założyć, że znajdują się one w warunkach adiabatycznych.

Zależność wartości ciepła wywiązanego  $W_t K_s$  w procesie spalania cząstki węgla oraz ciepła  $q_w$  odprowadzonego wskutek wymiany z otoczeniem od temperatury cząstki  $T_{cz}$  została przedstawiona na rys. 9.17.



Rys. 9.17. Wpływ temperatury cząstki węgla  $T_{cz}$  na wzajemny stosunek ciepła  $W_t K_s$  wywiązanego w czasie spalania do ciepła  $q_w$  odprowadzonego wskutek wymiany z otoczeniem

Krzywa  $W_t K_s$  ma dwa przebiegi. Dolna gałąź krzywej odpowiada kinetycznemu obszarowi spalania, a górna dyfuzyjnemu. Przecięcie dolnej gałęzi z krzywą ciepła odprowadzonego  $q_w$  odpowiada przypadkowi procesu kinetycznego zachodzącego w niskiej temperaturze. Warunkiem

przejścia na górną gałąź krzywej czyli warunkiem zapłonu jest styczność krzywych  $W_t k_s$  i  $q_w$  w punkcie 1.

Spalanie stacjonarne wystąpi w punkcie 3 przecięcia krzywych. Warunkiem przejścia z górnej gałęzi krzywej do dolnej (co może być spowodowane zwiększeniem odprowadzenia ciepła z powierzchni cząstki wskutek obniżenia temperatury otoczenia) jest styczność krzywych  $W_t k_s$  i  $q_w$  w punkcie 2. Temperatura w punkcie 1 odpowiada temperaturze zapłonu  $T_z$ , a temperatura w punkcie 2 — temperaturze zgaśnięcia  $T_t$ .

Posługując się równaniem [9.36] można określić zależność temperatury  $T_{cz}$  palącej się cząstki węgla od jej średnicy (zakładając, że cząstki są kuliste). W tym celu należy w równaniu to podstawić

$$K_s = (1 + \xi) \frac{k}{1 + \frac{1}{Sh} \frac{kd}{D}} \frac{1}{22,4} \frac{273}{T_0} O_2 \quad [9.37]$$

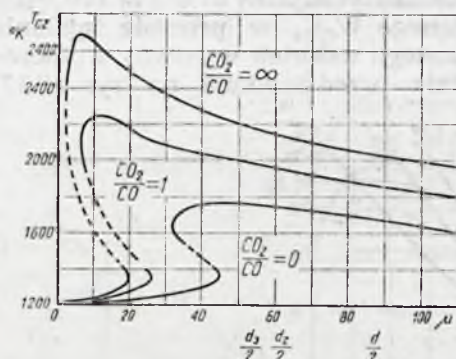
$$q_R = \sigma_R (T_{cz}^4 - T_0^4)$$

$$\xi = \frac{k_1}{k_1 + k_2}$$

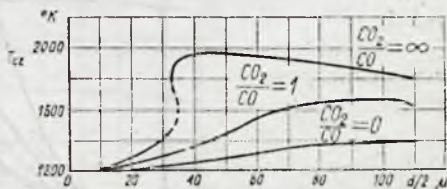
$$k = k_1 + k_2$$

gdzie:  $O_2$  — udział objętościowy tlenu w otoczeniu,  
 $k_1$  — stała szybkości reakcji  $C + O_2 = CO_2$ ,  
 $k_2$  — stała szybkości reakcji  $2C + O_2 = 2CO$ ,  
 $D$  — współczynnik dyfuzji molekularnej,  
 $d$  — średnica cząstki węgla,  
 $Sh = \beta d / D$  — liczba Sherwooda,  
 $\beta$  — współczynnik wymiany masy,  
 $R$  — stała gazowa,

W obliczeniach  $T_{cz} = f(d)$  przyjęto, że  $Sh = 2$ . Wynik obliczeń przedstawiono na rys. 9.18 i 9.19. Krzywe na rys. 9.18 odpowiadają przypad-



Rys. 9.18. Zależność temperatury  $T_{cz}$  palącej się cząstki węgla od jej średnicy  $d$  dla energii aktywnej  $E = 125 \times 10^3$  kJ/kmol:  $CO_2$  — ilość węgla spalona na  $CO_2$ ,  $CO$  — ilość węgla spalona na  $CO$ ,  $d_z$  — „średnica zapłonu”,  $d_t$  — „średnica zgaśnięcia”



Rys. 9.19. Zależność temperatury  $T_{cz}$  palącej się cząstki węgla od jej średnicy  $d$  dla energii aktywnej  $E = 83 \times 10^3$  kJ/kmol

kowi dużej koncentracji tlenu, wysokim temperaturom cząstki oraz dużej energii aktywacji. Krzywe z rys. 9.19 odnoszą się do mniejszych wartości tych wielkości.



W pierwszym przypadku można wprowadzić do rozważań „średnicę zapłonu”  $d_z$  oraz „średnicę zgaśnięcia”  $d_z$ . Przy  $d > d_z$  proces odpowiada górnej gałęzi krzywej ciepła wywołanego  $W_t K_s$  z rys. 9.17. Gdy w czasie spalania średnica cząstki zmniejsza się tak, że zostanie spełniony warunek  $d < d_z$ , wtedy nastąpi przejście procesu na dolną gałąź krzywej.

Z zależności na szybkość spalania cząstek węgla

$$\frac{d(d)}{d\tau} = - \frac{2K_s}{\rho_c}$$

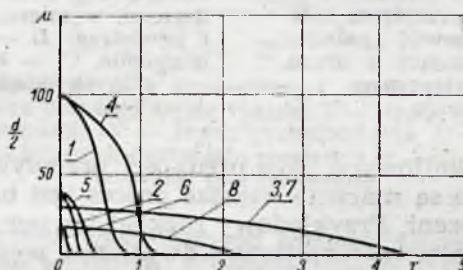
gdzie:  $\tau$  — czas spalania,

$K_s$  — jednostkowa szybkość spalania węgla określona równaniem [9.37]

$\rho_c$  — gęstość węgla,

$d$  — średnica cząstki kulistej węgla, można wyznaczyć funkcją  $\tau = f(d)$ .

Rezultat obliczeń podano na rys. 9.20. Z wykresów tam przedstawionych wynika bardzo interesujący i ważny dla praktyki wniosek. Gdy mianowicie początkowa średnica cząstki jest większa od „średnicy zapłonu”



Rys. 9.20. Zmiana kulistej średnicy cząstki węgla  $d$  w czasie spalania  $\tau$ :  $d_0$  — początkowa średnica cząstki,  $T_0$  — temperatura otoczenia, 1 —  $d_0 = 20 \mu$ ,  $T_0 = 1200^\circ\text{K}$ , 2 —  $d_0 = 80 \mu$ ,  $T_0 = 1200^\circ\text{K}$ , 3 —  $\alpha_0 = 60 \mu$ ,  $T_0 = 1200^\circ\text{K}$ , 5 —  $d_0 = 20 \mu$ ,  $T_0 = 300^\circ\text{K}$ , 6 —  $d_0 = 80 \mu$ ,  $T_0 = 300^\circ\text{K}$ , 7 —  $d_0 = 30 \mu$ ,  $T_0 = 1500^\circ\text{K}$ , 8 —  $d_0 = 30 \mu$ ,  $T_0 = 1400^\circ\text{K}$

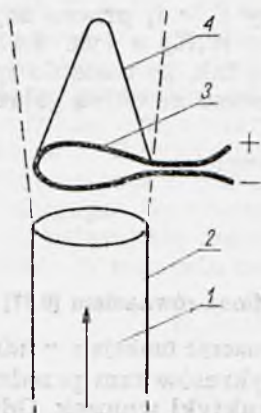
to, w przypadku procesu odpowiadającego dużej koncentracji tlenu, dużej energii aktywacji oraz wysokiej temperaturze, jej czas spalania może być krótszy od czasu spalania cząstki o początkowej średnicy mniejszej od  $d_z$ .

W czasie spalania mieszanki pyłu węglowego i powietrza w żagwi, najpierw reagują części lotne i małe cząstki węgla, co odbywa się przy dużej koncentracji tlenu. Dlatego temperatura cząstek może być wysoka i znacznie przewyższać temperaturę otaczającego gazu. Większe cząstki dopalające się na końcu żagwi, reagują w gorszych warunkach, to znaczy przy mniejszej koncentracji tlenu i dlatego ich temperatura zbliża się do temperatury gazu.

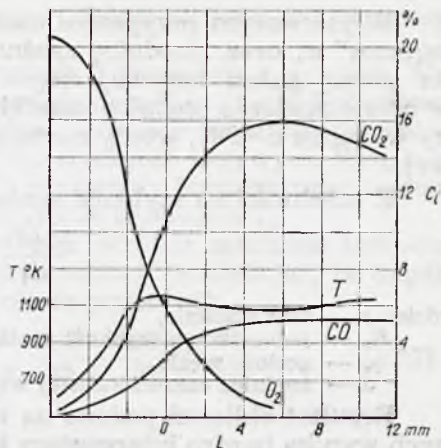
Mieszanekę pyłu węglowego i powietrza można spalać w warunkach laboratoryjnych w odpowiednio przystosowanym palniku zbliżonym pod względem konstrukcyjnym do palnika Bunsena (rys. 9.21). Jeśli w laminarnej strugę mieszanki wychodzącą z przewodu palnika wstawić pierścień z drutu ogrzewany prądem elektrycznym to będzie on stabilizował płomień tworząc stożek spalania podobny do występującego w mieszaninach gazowych.

Rozkład temperatury oraz koncentracji gazów biorących udział w tym procesie został przedstawiony na rys. 9.22.



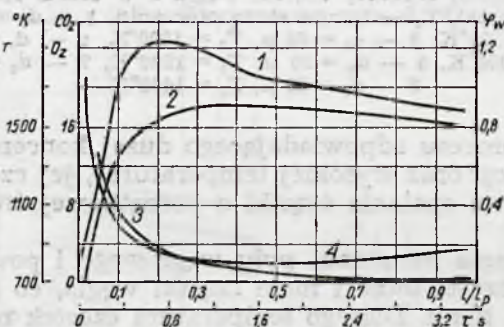


Rys. 9.21. Spalanie mieszanki pyłu węglowego i powietrza w strudze laminarnej: 1 — kierunek przepływu mieszanki palnej, 2 — przewód palnika, 3 — pierścień stabilizujący z drutu, ogrzewany prądem elektrycznym, 4 — stożek płomienia



Rys. 9.22. Rozkład temperatury oraz koncentracji gazów w płomieniu laminarnym, w mieszance pyłu węglowego i powietrza:  $L$  — odległość od czoła płomienia,  $C_i$  — koncentracja poszczególnych składników gazowych

W paleniskach kotłowych, gdy prędkości przepływu i średnice spalanych cząstek węgla są znacznie większe proces jest bardziej rozciągnięty w czasie i przestrzeni. Przykładowy rozkład temperatury, stopnia wypalenia paliwa oraz koncentracji tlenu i dwutlenku węgla w żagwi, w palenisku kotłowym został przedstawiony na rys. 9.23.

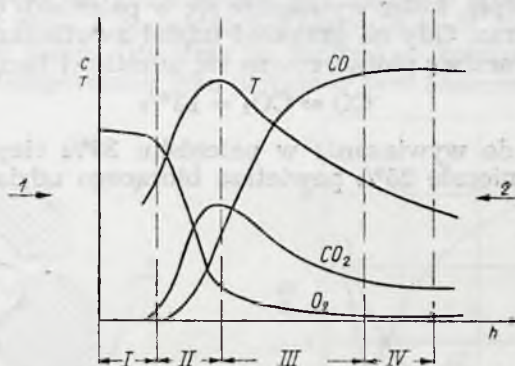


Rys. 9.23. Rozkład temperatury  $T$  stopnia wypalenia paliwa  $\varphi_w$  oraz koncentracji tlenu  $O_2$  i dwutlenku węgla  $CO_2$  w żagwi, w palenisku kotłowym: 1 — rozkład temperatury, 2 — rozkład koncentracji  $CO_2$ , 3 — rozkład stopnia wypalenia, 4 — rozkład koncentracji  $O_2$ ,  $l$  — odległość od palnika,  $l_p$  — całkowita długość płomienia

### 9.1.3. Spalanie węgla naturalnego w warstwie

Typowy rozkład temperatury i koncentracji tlenu oraz tlenku i dwutlenku węgla w warstwie paliwa palącego się na ruszcie, przedstawiono na rys. 9.24. Dotyczy on przypadku uproszczonego, gdy węgiel nie zawiera wilgoci oraz części lotnych.

Jeśli kierunek przepływu powietrza jest przeciwny do kierunku, z którego uzupełnia się paliwo, to w warstwie idąc zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza można wyróżnić następujące cztery strefy: strefę żużla, strefę utleniania, gdzie występują reakcje  $C + O_2 = CO_2$  lub  $2C + O_2 = 2CO$ , strefę redukcji (reakcja  $C + O_2 = 2CO$ ) oraz strefę przygotowania, w której zachodzi podgrzewanie węgla. Wysokość strefy

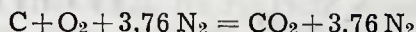


Rys. 9.24. Rozkład temperatury  $T$  i koncentracji  $C$  tlenu oraz tlenku i dwutlenku węgla w warstwie paliwa palącego się na ruszcie: I — strefa żużla, II — strefa utleniania, III — strefa redukcji, IV — strefa przygotowania,  $C$  — koncentracja;  $h$  — wysokość warstwy, 1 — kierunek przepływu powietrza, 2 — kierunek, z którego uzupełnia się spalony węgiel

utleniania zależy przede wszystkim od sortymentu węgla i wynosi 3÷5 średnic dla kawałków kulistych. Wysokość strefy redukcji jest 3÷4 razy większa od wysokości strefy utleniania.

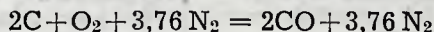
Skład gazów opuszczających warstwę zależy od jej wysokości i zawiera się między dwoma skrajnymi przypadkami:

— przypadku zupełnego spalania (wysokość warstwy odpowiada wysokości strefy utleniania)



Wtedy współczynnik nadmiaru powietrza przechodzącego przez warstwę i zużytego w procesie  $\alpha_w = 1$  i współczynnik wywiązywania się ciepła  $\xi_w = 1$ .

— przypadku zupełnej gazyfikacji to jest przekształcenia paliwa stałego w gazowe przez niezupełne spalanie (wysokość warstwy odpowiada sumie wysokości stref utleniania i redukcji)



Wtedy  $\alpha_w = 0,5$ , a  $\xi_w = 0,29$ .

Na rys. 9.25 przedstawiono zależność ciepła spalania gazów opuszczających warstwę paliwa, ich objętości współczynnika nadmiaru powietrza przechodzącego przez warstwę (przy założeniu, że wszystek tlen zawarty w tym powietrzu wszedł w jakąś reakcję z węglem) oraz współczynnika wydzielania ciepła, od zawartości w spalaniach  $CO$  i  $CO_2$ .

Stosunek ciepła wywiązanego w warstwie  $Q_1$  do wywiązanego w palenisku (nad warstwą)  $Q_2$  określa równanie

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\xi_w}{1 - \xi_w}$$



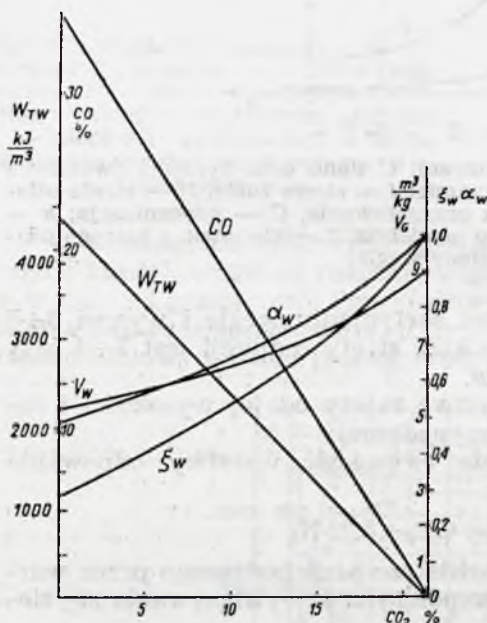
Odpowiada on następującemu stosunkowi powietrza zużytego podczas spalania w warstwie  $L_1$  i palenisku  $L_2$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\alpha_w}{1 - \alpha_w}$$

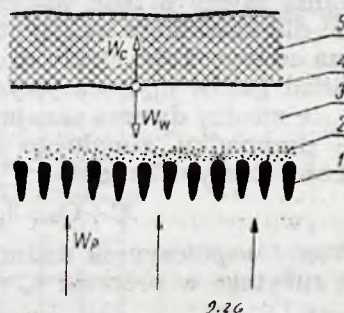
Na rys. 9.25 krzywa  $\alpha_w$  przebiega powyżej krzywej  $\xi_w$ . Określono więc udziałowi ciepła, które wywiązuje się w palenisku odpowiada mniejszy udział powietrza. Gdy na przykład udział dwutlenku węgla w gazach opuszczających warstwę paliwa równa się udziałowi tlenu węgla

$$\text{CO} = \text{CO}_2 = 13\%$$

wtedy pozostaje do wywiązania w palenisku 35% ciepła, ale będzie to wymagało tylko niecałe 25% powietrza biorącego udział w spalaniu zupełnym.



Rys. 9.25. Zależność ciepła spalania gazów opuszczających warstwę  $W_{Tw}$ , ich objętości  $V_w$ , współczynnika nadmiaru powietrza  $\alpha_w$  i współczynnika wywiązania się ciepła  $\xi_w$  od zawartości w spalinach CO i  $\text{CO}_2$



Rys. 9.26. Spalanie węgla w warstwie: 1 — ruszt, 2 — żużel, 3 — strefa reakcji, 4 — czoło płomienia, 5 — strefa przygotowania,  $w_p$  — prędkość przepływu powietrza,  $w_w$  — prędkość opadania węgla,  $w_c$  — prędkość przemieszczania się czoła płomienia

W warstwie, podczas ustalonego procesu, powstaje ustabilizowane czoło płomienia (rys. 9.26) na powierzchni, której położenie i ukształtowanie zależy od właściwości paliwa oraz parametrów termodynamicznych przepływającego powietrza. Warunek stabilizacji określony jest równaniem

$$w_c = w_w$$

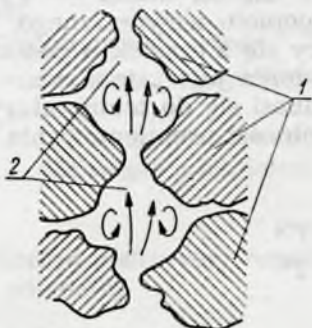
gdzie:  $w_c$  — prędkość przemieszczania się czoła płomienia,

$w_w$  — prędkość opadania węgla wskutek spalania i usuwania się popiołu do popielnika.

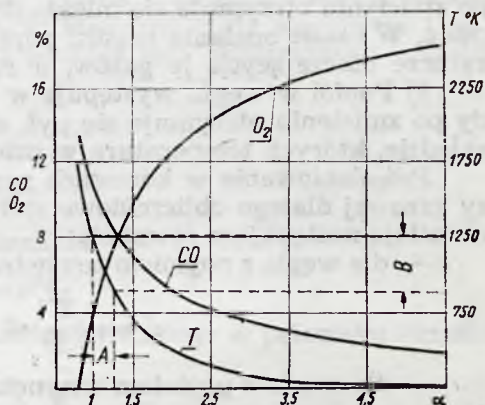


Model spalania w warstwie przedstawiono na rys. 9.27. Między kawałkami węgla powstają wolne przestrzenie, w których tworzą się wiry. Reakcja węgla z tlenem i  $\text{CO}_2$  zachodzi na jego powierzchni, w wolnych przestrzeniach, natomiast spalają się części lotne i CO.

Miejsce geometryczne punktów zapłonu mieszanki gazowej w przestrzeniach między kawałkami węgla tworzy powierzchnię stabilizacji czoła płomienia. Powietrze, które bierze tam udział w spalaniu jest wzbogacone w produkty reakcji pochodzące z niższych stref pozbawione w związku z tym części tlenu. Utrudnia to zapłon, co kompensuje w pewnym stopniu wysoka temperatura jaka panuje w tym obszarze.



Rys. 9.27. Model spalania w warstwie: 1 — kawałki węgla, 2 — wolne przestrzenie między kawałkami węgla, w których tworzą się wiry i występuje spalanie części lotnych i CO



Rys. 9.28. Najprawdopodobniejsze położenie strefy zapłonu: A — ze względu na współczynnik nadmiaru powietrza, B — ze względu na temperaturę

Najprawdopodobniejsze położenie strefy zapłonu jest określone odpowiednimi wartościami temperatury (900—1250°K) i współczynnika nadmiaru powietrza (1,0—1,25). Na rys. 9.28 przedstawiono, jak podczas przepływu powietrza przez warstwę węgla spada w nim koncentracja tlenu, a rośnie temperatura i koncentracja CO. Równocześnie zmniejsza się oczywiście wartość współczynnika nadmiaru. W ten sposób powstają dogodne warunki do zapłonu.

#### 9.1.4. Promieniowanie płomienia mieszanki pyłu węglowego i powietrza

Wielkością charakteryzującą promieniowanie ciał jest zdolność promieniowania, nazywana także emisyjnością, lub stopniem czarności. W przypadku płomienia mieszanki pyłu węglowego i powietrza, który uważa się za ciało szare zdolność promieniowania  $\epsilon$  określa zależność

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' - \epsilon' \epsilon''$$

gdzie:  $\epsilon''$  — zdolność promieniowania fazy gazowej,  
 $\epsilon'$  — zdolność promieniowania pyłu.

Zdolność promieniowania fazy gazowej zależy od udziału w niej gazów trójatomowych przede wszystkim  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$

$$\epsilon'' = \epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$$

Wartości  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$  i  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  wyznacza się z tablic, które można znaleźć w każdym podręczniku wymiany ciepła.

Zdolność promieniowania pyłu można obliczyć z równania

$$\varepsilon' = 1 - e^{-k' l}$$

gdzie:  $k'$  — współczynnik pochłaniania palącego się pyłu,  
 $l$  — średni efektywny rozmiar płomienia świecącego.

Wartość współczynnika  $k'$  zależy od rodzaju popiołu. Można wyróżnić dwa przypadki:

1) Popiół w węglu występuje w postaci popiołu zewnętrznego. Wtedy po zmieleniu otrzymuje się mieszaninę pyłu czystego węgla (koks) i popiołu. W czasie spalania cząstki popiołu mają temperaturę równą temperaturze otaczających je gazów, a rozżarzone cząstki koks — wyższą.

2) Popiół w węglu występuje w postaci popiołu wewnętrznego. Wtedy po zmieleniu otrzymuje się pył, składający się z cząstek o podobnym składzie, których temperatura w procesie spalania jest jednakowa.

Promieniowanie w komorach spalania odnosi się do temperatury fazy gazowej dlatego obliczeniowe wartości zdolności promieniowania pyłu określają następujące równania:

— dla węgla z popiołem zewnętrznym

$$\varepsilon' = \varepsilon'_k \frac{T'^4}{T^4} + \varepsilon'_z - \varepsilon'_k \varepsilon'_z \frac{T'^4}{T^4}$$

— dla węgla z popiołem wewnętrznym

$$\varepsilon' = \varepsilon'_y \frac{T'^4}{T^4}$$

gdzie:  $\varepsilon'_k$  — zdolność promieniowania cząstek koks,  
 $\varepsilon'_z$  — zdolność promieniowania cząstek popiołu,  
 $\varepsilon'_y$  — zdolność promieniowania cząstek węgla z popiołem wewnętrznym,  
 $T'$  — średnia temperatura cząstek,  
 $T$  — temperatura fazy gazowej płomienia.

Wyrażenie na współczynnik pochłaniania dla palącego się pyłu ma następującą postać:

— dla pyłu koksowego

$$k'_k \approx (1 - A_p) 2_n^{\frac{2}{3}} \psi^2 F'_c \frac{273}{V_s T}$$

— dla pyłu z popiołu

$$k'_z \approx A_p F'_c \frac{273}{V_s T}$$

— dla pyłu węglowego z popiołem wewnętrznym

$$k'_y = (q_n + A_p)^{\frac{2}{3}} \psi^2 F'_c \frac{273}{V_s T}$$

gdzie:  $A_p$  — udział masowy popiołu w węglu,  
 $\psi$  — współczynnik pęcznienia cząstek węgla (pod wpływem wydobywania się części lotnych),  
 $q_n$  — udział masowy cząstek węgla w żagwi, które nie weszły w reakcję z tlenem (na ogół  $q_n \approx 0$ ),  
 $F'_c$  — powierzchnia „ekranowania” żagwi przez pył,  $\text{m}^2/\text{kg}$  pyłu.  
 $V_s$  — objętość spalin, normalnych,  $\text{m}^3/\text{kg}$  węgla.



Jeśli założyć, że rozkład cząstek węgla w żagwi według średnic, odpowiada rozkładowi Rosina-Rammlera wtedy

$$F'_e \approx \frac{3 \cdot 10^6}{\rho_y} \frac{n \sqrt[n]{6,9 \ln(10 d_{mx})}}{d_{mx}}$$

gdzie:  $n$  — wykładnik funkcji rozdziału,

$d_{mx}$  — maksymalny rozmiar cząstek (odpowiadający 0,1% pozostałości na sicie),

$\rho_y$  — gęstość węgla.

W paleniskach kotłowych ponad 90% całej masy pyłu węglowego zdąży się spalić na 10% długości płomienia.

W związku z tym w obliczeniach można przyjąć, że średni współczynnik pochłaniania dla płonącej żagwi mieszanek pyłu węglowego i powietrza jest równy współczynnikowi pochłaniania rozżarzonych cząstek popiołu.

Otrzymuje się wtedy:

— dla węgla z popiołem zewnętrznym

$$k'_{sr} \approx k'_z$$

— dla węgla z popiołem wewnętrznym

$$k'_{sr} \approx \psi^2 k'_z$$

Średni efektywny rozmiar płomienia świecącego w palenisku określa się z równania

$$l \approx 3,6 \frac{V}{\sum F}$$

gdzie:  $V$  — objętość komory spalania,

$\sum F$  — powierzchnia wewnętrzna wszystkich ścian komory.

## 9.2. Spalanie stałych materiałów pędnych i wybuchowych

Stale materiały pędne używane w silnikach rakietowych dzielą się, stosownie do składu i struktury fizycznej, na dwie kategorie: materiałów jednorodnych i niejednorodnych, nazywanych także złożonymi.

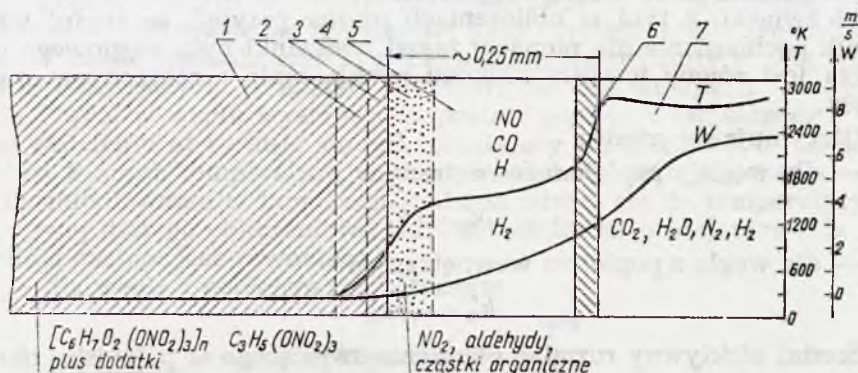
Podstawowymi składnikami materiałów jednorodnych są tworzące koloidalną mieszaninę estry kwasu azotowego: nitrogliceryna i nitroceluloza. Oprócz wymienionych składników jednorodny materiał pędny zawiera niewielkie ilości innych substancji. Należą do nich stabilizatory stosowane w celu zmniejszenia szybkości rozkładu w czasie przechowywania, flegmatyzatory, zmniejszające prędkość spalania, a ponadto substancje służące do obniżenia temperatury procesu oraz zwiększenia plastyczności i wytrzymałości ziaren.

Jednorodne materiały pędne, ze względu na szereg wad, są obecnie wypierane przez materiały złożone. Do wad tych należą: mała trwałość, duża zależność prędkości spalania od ciśnienia, znaczny koszt półproduktów oraz skomplikowane i niebezpieczne wykonanie.

Wady te w mniejszym stopniu występują w niejednorodnych materiałach pędnych. Powstają one przez rozproszanie cząstek dobrze rozdzielonej substancji utleniającej, w podłożu najczęściej żywicowym lub elastomerowym. Powszechnie spotykanymi utleniaczami w złożonych materiałach pędnych są azotany i nadchlorany.

## 9.2.1. Model spalania stałych materiałów pędnych

Spalanie jednorodnych materiałów pędnych następuje warstwami równoległymi, dlatego można je traktować jako proces jednowymiarowy, zmienny wzdłuż osi prostopadłej do płonącej powierzchni (rys. 9.29). Ponieważ substancja paląca się ma niską przewodność cieplną, zmiany w materiale pędnym wywołane przez zachodzące na powierzchni spalanie sięgają niezbyt daleko w głąb materiału.



Rys. 9.29. Spalanie jednorodnych materiałów pędnych: 1 — materiał jednorodny, 2 — strefa indukcji w fazie stałej, 3 — strefa reakcji w fazie stałej, 4 — strefa syntezy, 5 — strefa indukcji w fazie gazowej, 6 — strefa płomienia (szybkiego spalania w fazie gazowej), 7 — spaliny

Ruch ciepła od płomienia w kierunku znajdującego się w fazie stałej materiału pędnego powinien być wystarczający do utrzymania temperatury reagujących substancji w poszczególnych warstwach na poziomie potrzebnym do zachowania ciągłości reakcji. W ten sposób wytwarza się stan ustalony, scharakteryzowany stałymi natężeniami przepływu masy i energii przez strefę spalania oraz stałymi gradientami koncentracji i temperatury.

Pierwszą strefą materiału, do której dochodzi oddziaływanie płomienia jest warstwa podpowierzchniowa nazywana strefą rozkładu (na rys. 9.29 oznaczona przez 2 i 3). Wzrost temperatury w tej warstwie wywołuje egzotermiczny rozkład nitrocelulozy i nitrogliceryny na produkty gazowe. Innym źródłem ciepła ogrzewającego warstwę podpowierzchniową, poza promieniowaniem strefy szybkiego spalania w fazie gazowej (na rys. 9.29 oznaczonej przez 6) jest reakcja między nitrogliceryną i nitrocelulozą, a składnikiem stabilizującym (np. centralitem etylowym).

Zadaniem składników stabilizujących jest reagowanie z tlenkami azotu, które powstają przy samorzutnym rozkładzie nitrogliceryny i nitrocelulozy podczas składowania paliwa i zapobieganie w ten sposób przyspieszonej reakcji autokatalicznej. W wysokiej temperaturze substancje stabilizujące mogą reagować bezpośrednio z nitrogliceryną i nitrocelulozą, a reakcja ta ma charakter egzotermiczny.

Tworzenie się mieszaniny gazowej w wyniku reakcji w strefie rozkładu jest uważane za proces, który kontroluje szybkość spalania stałych materiałów pędnych. Powstałe w strefie rozkładu cząstki nie nasycone są wyrzucane w kierunku fazy gazowej prostopadle do powierzchni paliwa.



Cząstki te zapoczątkowują reakcję drugiego rzędu w następnej strefie, zwanej strefą syczenia. Produktami reakcji są tu: tlenki azotu oraz poszczególne związki organiczne łącznie z takimi trwałymi produktami końcowymi jak azot, para wodna, tlenek i dwutlenek węgla.

Z kolei następują przemiany o charakterze przygotowawczym (strefa indukcji w fazie gazowej), w których tworzą się aktywne składniki ( $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{H}_2$ ), praktycznie bez wydzielania ciepła.

W końcowym stadium procesu tlenki azotu reagują z pozostałymi utleniającymi się składnikami, a produkty tych reakcji dążą do osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej. Temperatura płomienia osiąga wówczas swą maksymalną wartość około  $3000^\circ\text{K}$ , strefa reakcji zaś intensywnie świeci.

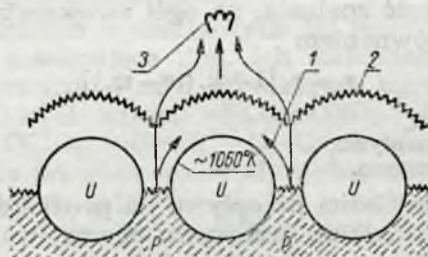
Przedstawiony model jest ogólny. Istnieją także jego prostsze przypadki, np. bez strefy indukcji w fazie gazowej, co występuje przy spalaniu pod wysokim ciśnieniem. Dla złożonych materiałów pędnych zmiany w tym modelu dotyczą głównie zjawisk zachodzących w strefie rozkładu. Ze względu na niejednorodność tej strefy, poszczególne elementy paliwa i utleniacza rozkładają się niezależnie, ale prędkości ich rozkładu muszą być równe. Można to wyrazić posługując się równaniem Arrheniusa na szybkość reakcji

$$k_p e^{-\frac{E_p}{RT_p}} = k_u e^{-\frac{E_u}{RT_u}} \quad [9.38]$$

gdzie:  $k_p$ ,  $k_u$  — stałe szybkości reakcji dla paliwa i utleniacza,  
 $E_p$ ,  $E_u$  — energie aktywacji paliwa i utleniacza,  
 $T_p$ ,  $T_u$  — temperatura, w której następuje rozkład paliwa i utleniacza,  
 $R$  — stała gazowa.

Wartości energii aktywacji oraz stałych szybkości reakcji są różne dla paliwa i utleniacza. Aby więc równanie [9.38] mogło być spełnione, różnice te muszą być skompensowane przez odpowiednie temperatury składników reakcji. Procesy rozkładu paliwa są endotermiczne, a utleniacza egzotermiczne. Ponieważ ilość utleniacza jest większa od ilości paliwa to w efekcie sumaryczny proces rozkładu jest egzotermiczny.

Większość utleniaczy ma temperaturę rozkładu wyższą od temperatury rozkładu paliwa. Dlatego kryształki utleniacza występują ponad po-



Rys. 9.30. Powierzchnia spalania niejednorodnych (złożonych) materiałów pędnych: 1 — dyfuzja paliwa zgazowanego, 2 — wstępne utlenianie, 3 — reakcja płomieniowa

wierzchnię paliwa i w ten sposób są w kontakcie ze strefami o wyższej temperaturze. Powierzchnię spalania tego rodzaju materiałów pędnych przedstawiono schematycznie na rys. 9.30.

Niejednorodność złożonych materiałów pędnych powoduje niejednorodność strefy gazowej. Dlatego reakcje chemiczne zawsze poprzedza miesza-

nie. W niskich ciśnieniach szybkość mieszania gazowych produktów rozkładu paliwa i utleniacza przewyższa szybkość reakcji chemicznych. Procesem kontrolującym spalanie są tu więc reakcje w fazie gazowej i dlatego proces znajduje się w obszarze kinetycznym.

Przy dużych ciśnieniach, gdy szybkość reakcji chemicznych jest duża, prędkość spalania jest kontrolowana przez dyfuzję i cały proces znajduje się w obszarze dyfuzyjnym.

### 9.2.2. Prędkość spalania stałych materiałów pędnych

Na prędkość spalania stałych materiałów pędnych ma wpływ szereg czynników, z których najważniejszymi są: ciśnienie gazów znajdujących się w kontakcie z powierzchnią spalania, początkowa temperatura ładunku oraz prędkość omywania powierzchni spalania stycznym strumieniem gazów.

Przyrost ciśnienia powoduje na ogół przyrost prędkości spalania. Zależność tę opisuje następujące równanie

$$r = a + b p^n \quad [9.39]$$

gdzie:  $r$  — prędkość spalania stałego materiału pędnego (liniowa — mm/s lub masowa g/s),

$p$  — ciśnienie, bar,

$a, b, n$  — stałe zależne od właściwości materiału pędnego oraz warunków fizycznych.

Wpływ temperatury na prędkość spalania można wyrazić za pomocą następującej zależności

$$r = r_0 e^{S(T-T_0)} \quad [9.40]$$

gdzie:  $T$  — temperatura ładunku,

$T_0$  — temperatura odniesienia,

$S$  — stała,

$r_0$  — prędkość spalania w temperaturze odniesienia.

Oddziaływanie temperatury na przebieg spalania jest tym intensywniejsze im jej wartość jest większa.

Struga gazów przepływająca równolegle do powierzchni palącego się ziarna zmienia prędkość spalania, na ogół zwiększając jej wartość, zgodnie z następującym równaniem

$$r = r_0 [1 + k_r (w - w_0)] \quad [9.41]$$

gdzie:  $k_r$  — współczynnik,

$w$  — prędkość przepływu,

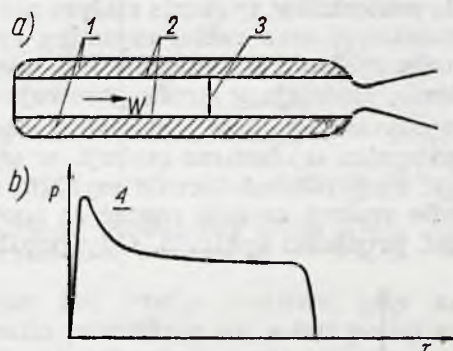
$w_0$  — prędkość progowa.

Oddziaływanie prędkości przepływu na prędkość spalania występuje po osiągnięciu przez prędkość przepływu pewnej wartości progowej. Dla jednorodnych materiałów pędnych prędkość progowa wynosi około 200 m/s.

Występowanie tego rodzaju spalania, które nosi nazwę erozyjnego pociąga za sobą wzrost ciśnienia w komorze. Wzrost ten znika w miarę zwiększania się powierzchni przelotu i zmniejszania prędkości przepływu spalin poniżej prędkości progowej. Związane z tym zjawiskiem powstanie tzw. szczytu erozyjnego przedstawiono na rys. 9.31. Jest to efekt niepożądany przede wszystkim ze względu na wytrzymałość silnika. Można go uniknąć albo przez zwiększenie początkowej powierzchni przelotu, co jed-



nak zmniejsza stopień wypełnienia komory materiałem pędnym, albo też przez takie zaprojektowanie kształtu ziarna, który by w pierwszym okresie pracy silnika zapewniał odpowiednio dobraną progresję spalania



Rys. 9.31. Spalanie erozyjne: a — silnik rakietowy na stały materiał pędny z ładunkiem o wewnętrznej powierzchni spalania, b — rozkład ciśnienia w komorze spalania silnika w czasie z występującym szczytem erozyjnym, 1 — ładunek stałego materiału pędnego, 2 — powierzchnie, na których zachodzi spalanie, 3 — powierzchnia przelotu,  $\tau$  — czas spalania, 4 — szczyt erozyjny

(zwiększenie powierzchni na której zachodzi proces) dostosowaną do zwiększania się powierzchni przelotu.

Opisany proces spalania stałych materiałów pędnych dotyczy także innych mieszanin paliw i utleniaczy znajdujących się w stanie stałym (w fazie skondensowanej), a więc także i materiałów wybuchowych. Z punktu widzenia składu materiały wybuchowe dzielą się na związki chemiczne i mieszaniny.

Wybuchowe związki chemiczne stanowią nietrwałe układy bardzo skłonne pod wpływem bodźców zewnętrznych do szybkich reakcji egzotermicznych nazywanych spalaniem wewnętrznym, w wyniku których zachodzi całkowite rozerwanie więzi między cząsteczkami i atomami związku oraz następująca po tym ich rekombinacja w produkty będące już w równowadze termodynamicznej.

Większość materiałów wybuchowych tej grupy stanowią chemiczne związki organiczne zawierające tlen. Ich skłonność do wybuchu jest uwarunkowana obecnością w nich określonych ugrupowań atomów tzw. eksplozoforów, do których należą:  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{ONO}_2$ ,  $-\text{N}=\text{N}-$ ,  $-\text{NCl}_2$ ,  $=\text{C}-$ ,  $-\text{N}-$ ,  $-\text{OCClO}_2$ ,  $-\text{OClO}_2$ ,  $-\text{O}-\text{O}$ ,  $-\text{O}-\text{O}-\text{O}-$ ,  $-\text{C}=\text{C}-$ . Mieszaniny wybuchowe podobnie jak stałe materiały pędne zawierają dwa nie związane ze sobą chemicznie składniki. Jeden z nich, bogaty w tlen, pełni funkcję utleniacza, a drugi paliwa. Mieszaniny te mogą być jednorodne lub niejednorodne.

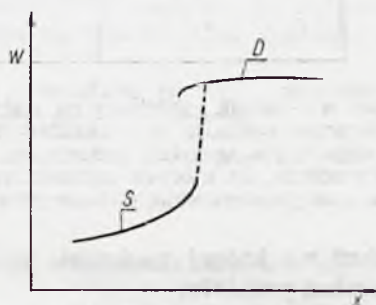
Przykładem mieszanin wybuchowych są stosowane w górnictwie amonity, będące różnie dobraną mieszaniną azotanu amonu z nitro związkami aromatycznymi i z pewnymi dodatkami np. z glinem lub mączką drzewną.

Amonity należą do materiałów tanich, o nieskomplikowanej technologii otrzymywania. Cechuje je mała wrażliwość na bodźce mechaniczne i cieplne i w związku z tym są bezpieczne w wytwarzaniu, transporcie i użytkowaniu.

### 9.2.3. Detonacja stałych materiałów pędnych i wybuchowych

Podczas spalania materiałów w stanie stałym nie ma możliwości wytworzenia fali uderzeniowej oraz ruchu czynnika przed czołem płomienia. Przy przejściu więc spalania w detonację fala uderzeniowa, która jest warunkiem jej istnienia, powstaje w strefie gazowej.

Cechą charakterystyczną spalania materiałów stałych jest bardzo duży przyrost objętości spalin w obszarze reakcji, w wyniku zmiany stanu ze stałego w gazowy. Przy niedostatecznie szybkim odprowadzeniu spalin, ciśnienie w strefie reakcji znacznie rośnie co spowoduje (rów. [9.39]) jednocześnie przyrost prędkości spalania. Gdy prędkość ta osiągnie od-



Rys. 9.32. Przejście spalania w detonację w materiałach stałych:  $x$  — współrzędna,  $w$  — liniowa prędkość przemieszczania się czoła płomienia,  $s$  — spalanie,  $D$  — detonacja

powiednią wartość wtedy następuje przejście ze spalania w detonację (rys. 9.32).

Naruszenie warunków równowagi w procesie i w związku z tym jego przyspieszenie może być także spowodowane zwiększeniem powierzchni spalania, co zdraża się, gdy na przykład, w pewnym miejscu ładunku stałego materiału pędnego, wystąpią pory.

W ogólnym przypadku warunek spalania ustalonego spełnia równanie

$$r_1 = r_2$$

gdzie:  $r_1$  — prędkość spalania, g/s odpowiadająca szybkości wytwarzania spalin,  
 $r_2$  — szybkość odprowadzania spalin ze strefy reakcji.

Obydwie szybkości, wytwarzania i odprowadzania spalin są funkcjami ciśnienia:

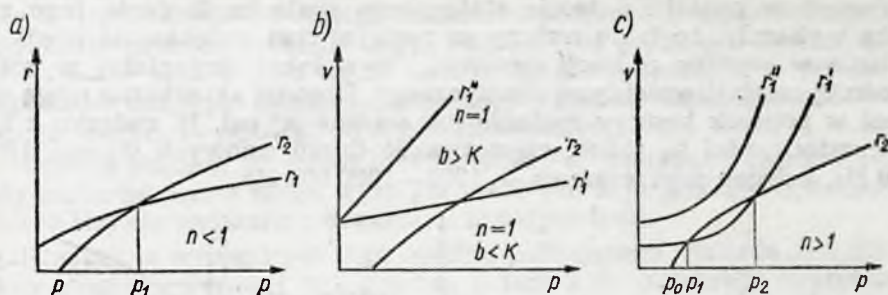
$$r_1 = a + b p^n \quad [9.42]$$

$$r_2 = K p \quad [9.43]$$

gdzie:  $a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $K$  — stałe,  
 $p$  — ciśnienie.

Zależności [9.42] i [9.43] zostały przedstawione wykreślnie z zastrzeżeniem, o którym będzie mowa poniżej, na rys. 9.33. Przy  $p = p_0$  to jest, gdy ciśnienie panujące w czołe płomienia jest równe ciśnieniu zewnętrznemu, szybkość odprowadzania spalin  $r_2 = 0$ . Ze wzrostem ciśnienia wartość  $r_2$  też rośnie, początkowo wg pewnej krzywej, a potem już ściśle, zgodnie z równaniem [9.43], to znaczy proporcjonalnie do ciśnienia.





Rys. 9.33. Zależność szybkości wytwarzania spalin  $u_1$  oraz szybkość ich odprowadzania  $u_2$  w strefie reakcji od ciśnienia: a)  $-n < 1$ , b)  $-n = 1$ , c)  $-n > 1$

Spalanie ustalone jest wtedy możliwe, gdy krzywa wytwarzania i odprowadzania spalin przecinają się, a kąt pochylenia krzywej wytwarzania jest mniejszy od kąta pochylenia odcinka prostego, krzywej odprowadzania.

Gdy  $n < 1$  (rys. 9.33a) przecięcie krzywych następuje przy ciśnieniu  $p_1$ . Ale niezależnie od wartości tego ciśnienia zawsze będzie

$$r_2 > r_1$$

a więc zawsze też będzie możliwe spalanie ustalone.

Gdy  $n > 1$  (rys. 9.33c), dla krzywej  $r_1''$  spalanie ustalone jest w ogóle niemożliwe. Natomiast dla krzywej  $r_1'$  jest możliwe tylko do ciśnienia  $p_2$ .

Gdy  $n = 1$  (rys. 9.33b), co się najczęściej spotyka w praktyce, występują przypadki:

—  $b < K$ , wtedy spalanie ustalone jest możliwe,

—  $b > K$ , wtedy przy dowolnej wartości  $p$ ,  $u_1 > u_2$  co prowadzi do zwiększenia ciśnienia w strefie reakcji i przejścia spalania w detonację.

Warunkiem zachowania spalania ustalonego, gdy  $n = 1$  jest nie wartość prędkości spalania, ale wartość jej pochodnej względem ciśnienia. Spalanie będzie miało charakter ustalony, gdy zostanie spełniona nierówność

$$\frac{dr_1}{dp} > K$$

Z przeprowadzonej analizy przejścia spalania w detonację stałych materiałów pędnych i wybuchowych wynikają następujące wnioski:

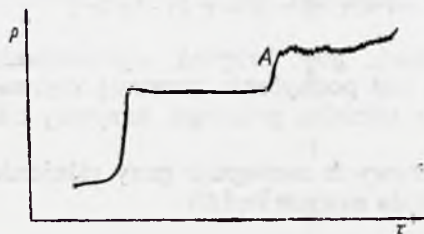
— wysokie ciśnienie sprzyja przejściu spalania w detonację. W związku z tym w pewnych przypadkach jest ono możliwe tylko w naczyniu zamkniętym,

— przejście spalania w detonację jest wynikiem naruszenia bilansu masowego, spalin wytwarzanych w procesie i spalin odprowadzonych ze strefy reakcji. Częstym powodem tego zjawiska jest wzrost powierzchni reakcji wskutek wystąpienia w materiale porów, lub szczelin spowodowanych pęknięciami.

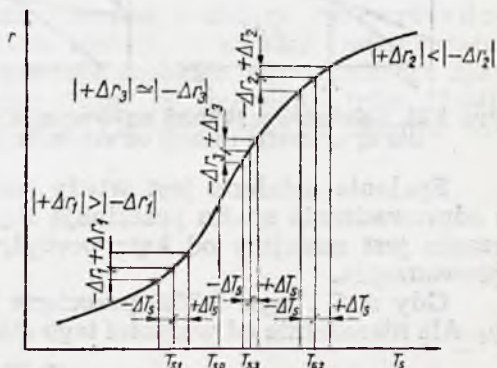
#### 9.2.4. Spalanie pulsujące stałych materiałów pędnych

W silnikach rakietowych na stały materiał pędny występują niekiedy wysokie lub przyrosty ciśnienia (rys. 9.34), których nie można wy-

tłumaczyć w oparciu o teorię statecznego spalania. Badania tego zjawiska wykazały, że takie zmiany są następstwem zwiększenia prędkości spalania w wyniku pulsacji ciśnienia, wywołanej drganiami wysokiej i średniej częstotliwości typu akustycznego. Drgania akustyczne mogą wystąpić w poprzek komory spalania lub wzdłuż jej osi. W związku z tym ich częstotliwości są różne: częstotliwość drgań osiowych wynosi 100—1000 Hz, a drgań poprzecznych — 1000—1000 000 Hz.



Rys. 9.34. Rozkład ciśnienia w czasie, w komorze spalania silnika rakietowego na stały materiał pędny, przy wystąpieniu spalania pulsującego wysokiej częstotliwości: A — wzrost ciśnienia spowodowany wystąpieniem spalania pulsującego



Rys. 9.35. Zależność zmian prędkości spalania od zmian temperatury powierzchni materiału pędnego:  $T_{s1}$  — temperatura powierzchni mniejsza od temperatury przegięcia,  $T_s$  — temperatura przegięcia,  $T_{s2}$  — temperatura powierzchni większa od temperatury przegięcia,  $T_{s3}$  — temperatura powierzchni na odcinku linii o małej krzywiznie, kiedy zmiany prędkości spalania wywołane zmianami temperatury są nieznaczne

W jaki sposób drgania akustyczne powodują przyrost prędkości spalania wyjaśniono na rys. 9.35. Wykres na tym rysunku przedstawia zależność (określoną równaniem Arrheniusa) prędkości spalania od temperatury  $T_s$  powierzchni palącego się materiału pędnego. Krzywa tej zależności ma punkt przegięcia, poniżej którego jest ona wklęsła, a powyżej wypukła.

Drgania akustyczne wywołują okresowe pulsacje ciśnienia, które z kolei zmieniają temperaturę powierzchni materiału pędnego.

Jeżeli temperatura ta jest mniejsza od temperatury w punkcie przegięcia, to jednakowym jej zmianom będą odpowiadały większe przyrosty i mniejsze spadki prędkości spalania, tak że średnia prędkość spalania w przeciągu całego okresu drgań będzie większa od prędkości w warunkach ustalonych. To spowoduje przyrost ciśnienia w komorze spalania, które będzie rosnąć, aż do powstania w niej warunków odpowiadających punktowi przegięcia. W tym punkcie jednakowe zmiany ciśnienia odpowiadają takim samym zmianom prędkości spalania.

Opisane zjawisko wystąpi jednak tylko wtedy, gdy drgania akustyczne zostaną odpowiednio wzmocnione energią uzyskaną ze spalania. Jest to możliwe w przypadku spełnienia przez układ kryterium Rayleigha [6.97] wymagającego zgodności faz zmiany ciśnienia i wywiązywania się ciepła, co jest uwarunkowane odpowiednią wartością opóźnień w reakcji procesów chemicznych na zmianę warunków fizycznych.

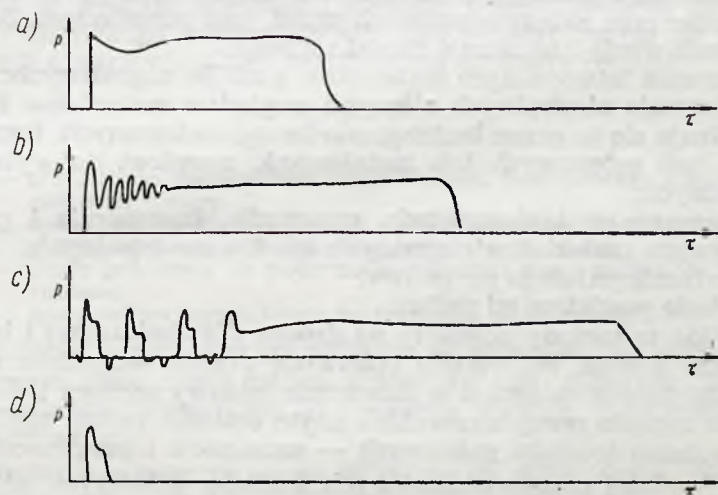


Skuteczną metodą zwalczania spalania pulsującego wysokiej częstotliwości jest dodanie do stałego materiału pędnego sproszkowanego aluminium. W procesie spalania cząstki aluminium reagują z tlenem, a powstałe w ten sposób jego tlenki twórczą krople zawieszone w strefie reakcji, które działając tłumiąco na pulsacje ciśnienia izolują powierzchnię spalania materiału pędnego od drgań akustycznych.

Oprócz pulsacji wysokiej częstotliwości w silnikach raketowych na stały materiał pędny mogą wystąpić także pulsacje niskiej częstotliwości (1—100 Hz) nie związane z drganiami akustycznymi.

Przyczyną wystąpienia tego rodzaju pulsującego spalania jest źle dobrany stosunek czynnej powierzchni ładunku do przekroju krytycznego dyszy silnika. Gdy stosunek ten jest zbyt mały, wtedy ciśnienie równowagi w komorze spalania, określone równością szybkości wytwarzania spalin oraz ich odprowadzania przez dyszę, jest niższe od pewnego minimalnego, które zapewnia spalanie stateczne.

W miarę spadku ciśnienia panującego w komorze silnika raketowego strefa reakcji płomieniowych oddala się od powierzchni materiału pędnego, aż przy pewnym ciśnieniu znika w ogóle. Reakcje na powierzchni mogą jeszcze wtedy zachodzić tworząc produkty zawierające aktywne składniki, którymi jest wypełniona komora spalania. W pewnej chwili



Rys. 9.36. Spalanie pulsujące niskiej częstotliwości:  $p$  — ciśnienie,  $\tau$  — współrzędna czasu

może tam nastąpić wybuch, który przyspieszy proces spalania i zainicjuje powstanie strefy reakcji płomieniowych w pobliżu powierzchni materiału pędnego.

W zależności od wartości ciśnienia równowagi w komorze silnika raketowego opisane zjawisko ma różny wpływ na przebieg spalania (rys. 9.36). W przypadku granicznym (rys. 9.36d), po wzroście ciśnienia spowodowanym zapłonem, następuje całkowite zgaszenie spalania. W przypadku a) wpływ ten zaznacza się tylko niewielkim siodłem na krzywej ciśnienia w początkowym stadium procesu. Wykresy b) i c) przedstawiają przypadki pośrednie.

### 9.3. Pożary

Samorzutne i niekontrolowane rozprzestrzenianie się płomienia, powodujące straty materialne, stanowi od tysiącleci jedną z największych plag społecznych, na którą do dziś nie wynaleziono skutecznego sposobu. Wiedza o pożarach jako o jednym z procesów spalania jest stosunkowo niewielka i polega głównie na, zresztą kontrowersyjnych często, jakościowych opisach poszczególnych zjawisk oraz na znajomości nielicznych korelacji między wielkościami występującymi w tych zjawiskach. W pewnych przypadkach sprawa wygląda jeszcze gorzej. Na przykład do tej pory nie wiadomo nawet jakie dokładnie są potrzebne informacje, aby można było przewidzieć szybkość rozprzestrzeniania się pożarów w lesie.

Mimo różnorodności i wielkiej złożoności pożarów można w nich łatwo zaobserwować wspólne cechy oraz prawidłowość przebiegu. Niezbędnymi składnikami pożaru są zawsze ciepło, paliwo i powietrze. Proces zapoczątkowuje podgrzanie pewnej części paliwa aż do zapłonu. Następnie zapłon przechodzi na znajdujące się w otoczeniu paliwo, co powoduje przyspieszenie procesu. Potem spalanie wstępuje w stadium ustalone, które trwa aż do wyczerpania się zasadniczej masy paliwa. Wtedy zachodzi dopalanie i wreszcie ochłodzenie części niepalnych i resztek paliwa do temperatury otoczenia.

Te obserwacje pomogły w znalezieniu najważniejszych środków tłumiących pożar oraz zabezpieczających przed jego powstaniem. Są to:

- 1) poszukiwanie i usuwanie źródeł zapłonu;
- 2) usuwanie łatwopalnych materiałów z miejsc zagrożonych;
- 3) izolowanie niezbędnych z innych względów materiałów łatwopalnych. Realizuje się to przez budowę murów ogniochronnych, kopanie fos, wycinanie linii ostępowych lub instalowanie urządzeń do wytwarzania kurtyn wodnych;
- 4) stosowanie w budownictwie, przemyśle, transporcie i gospodarstwie domowym materiałów niepalnych lub trudno zapalnych;
- 5) chłodzenie palącego się paliwa;
- 6) odcięcie powietrza od paliwa.

Wszystkie te metody powstały na drodze doświadczalnej i były znane od bardzo dawna. Ich rozwój opiera się przede wszystkim na przyswajaniu niektórych osiągnięć w dziedzinie budowy maszyn i chemii. Na przykład do napędu pomp strażackich użyto ostatnio turbin spalinowych, a do przewożenia środków gaśniczych — samolotów i śmigłowców.

Do najbardziej rozpowszechnionych środków gaśniczych należą:

1) woda, odznaczająca się obok niepalności dużym ciepłem właściwym oraz łatwością transportu hydraulicznego. Stosowanie wody jako środka gaśniczego jest przeciwwskazane w przypadku ciał rozżarzonych do bardzo wysokiej temperatury, instalacji elektrycznych pod napięciem oraz cieczy łatwopalnych;

2) piana, w postaci pęcherzyków powietrza lub dwutlenku węgla, otoczonych błoną cieczy, izolująca płonący materiał od dostępu tlenu. Do nadania pianie trwałości służą wchodzące w jej skład substancje powierzchniowo czynne, które posiadają zdolność gromadzenia się na powierzchni granicznej dwu różnych faz (w tym wypadku ciekłej i gazowej) oraz obniżania napięcia powierzchniowego i międzyfazowego, co czyni pianę stabilną;

3) dwutlenek węgla, będący uniwersalnym środkiem gaśniczym stosowanym w stanie ciekłym, w butlach, pod ciśnieniem 40÷70 bar. Po



nagłym rozprężeniu do ciśnienia atmosferycznego zaczyna on gwałtownie parować pochłaniając duże ilości ciepła z otoczenia i dzięki temu nie tylko izoluje płonący materiał od dostępu tlenu, lecz ponadto intensywnie go chłodzi;

4) czterochlorek węgla ( $\text{CCl}_4$ ), bardzo szybko parujący przy zetknięciu z płonącym materiałem (dzięki niskiej temperaturze wrzenia oraz niewielkiemu ciepłu parowania), który zostaje otoczony grubą warstwą gazów utrudniających dostęp tlenu;

5) proszki gaśnicze, których głównymi składnikami są węglan sodu oraz kwaśny węglan sodu. Ich działanie polega na odizolowaniu płonących ciał od dostępu tlenu, przede wszystkim wskutek topienia się w wysokich temperaturach i tworzenia na ich powierzchni szklistej powłoki.

Istotą pożaru, jak zresztą każdego spalania, jest samoczynne przemieszczanie się płomienia w przestrzeni, w której w różny sposób jest rozmieszczone paliwo. Przestrzeń ta poza paliwem i materiałami niepalnymi musi być wypełniona powietrzem. Warunkiem samoczynnego przemieszczania się płomienia jest ogrzewanie do temperatury zapłonu warstwy paliwa przylegającej do strefy reakcji, wskutek promieniowania, konwekcji gorących spalin i powietrza oraz przerzutów różnego rodzaju płonących elementów spowodowane najczęściej wiatrem lub działaniem grawitacji. W każdym przypadku prędkość przemieszczania się czoła płomienia (rozumianego makroskopowo) jest proporcjonalna do ciepła wymienionego z warstwą paliwa przylegającą do strefy reakcji

$$w = \frac{Q}{Q_F M_F} \quad [9.44]$$

gdzie:  $w$  — prędkość przemieszczania się płomienia, jednoznaczna z prędkością szerzenia się pożaru,

$Q$  — ciepło przeniesione z pożaru do świeżego paliwa w jednostce czasu, przypadające na jednostkę długości czoła płomienia,

$Q_F$  — ciepło potrzebne do podgrzania jednostki masy paliwa do temperatury zapłonu,

$M_F$  — masa paliwa przypadająca na jednostkę powierzchni.

Najczęściej występującym paliwem w pożarach jest drewno: w stanie surowym, jako żywa roślina drzewiasta (w pożarach lasów) oraz w stanie uformowanym przez odpowiednią obróbkę, jako budulec (w pożarach budynków).

W drewnie występuje około 50% węgla, 43% tlenu, 6% wodoru, 0,04—0,26% azotu oraz 0,3—1,2% związków mineralnych.

Pod działaniem wysokiej temperatury drewno ulega rozkładowi termicznemu, w którym rozróżnia się cztery stadia:

1) do temperatury 440°K wydziela się woda;

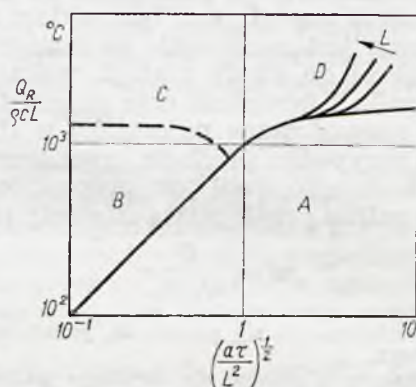
2) w temperaturze 440—540°K wydzielają się gazy  $\text{CO}$  i  $\text{CO}_2$ ;

3) w temperaturze 540—550°K następuje silne wydzielanie się kwasu octowego, metanolu i smoły;

4) w temperaturze 550—770°K wydzielają się węglowodory.

W wyniku, na przykład, destylacji rozkładowej drewna sosnowego (to znaczy jego rozkładu termicznego bez dostępu powietrza) otrzymuje się: węgla drzewnego — 37,83%,  $\text{CO}_2$  — 10,13%,  $\text{CO}$  — 3,74%,  $\text{CH}_4$  — 0,23, innych węglowodorów — 0,59%, kwasu octowego — 3,5%, metanolu — 0,88%, smoły rozpuszczonej w kwasie octowym — 8,03%, smoły osadowej — 11,79% oraz wody — 22,27%.

Pożar zabudowań polega zwykle na przemieszczaniu się spalania wzdłuż ścian, podłóg oraz początkowo spodniej, a potem wierzchniej strony sufitów i dachów. Wzrost intensywności pożaru jest następstwem rozgałęziania się płomieni, które zależy od kształtu oraz rozmieszczenia materiału palnego w budynku. Materiałem palnym jest tam przeważnie drewno, które nim zapali się (temperatura zapłonu drewna wynosi  $\sim 580^\circ\text{K}$ ) ulega rozkładowi termicznemu. Proces rozkładu jest reakcją endotermiczną, do której ciepło dopływa ze strefy spalania. Drewno należy do materiałów źle przewodzących ciepło (przewodność sosny w poprzek włókien jest 425 razy mniejsza od przewodności stali) dlatego spalanie rozchodzi się przede wszystkim po jego powierzchni, która jest ogrzewana do temperatury zapłonu przez konwekcję i promieniowanie. Źródłem promieniowania są objęte pożarem i żarzące się już materiały palne oraz płomień powstały ze spalania produktów ich rozkładu termicznego. Spalanie w głąb drewna postępuje powoli, ale ono właśnie decyduje o niszczącym działaniu pożarów.



Rys. 9.37. Zapłon i spalanie drewna pod wpływem energii promieniowania:  $\frac{Q_R}{\rho c L}$  — wyrażenie charakteryzujące energię promieniowania,  $\frac{a\tau}{L^2}$  — liczba Fouriera, A — obszar niewystępowania zapłonu, B — obszar zapłonu i spalania krótkotrwałego, C — obszar ciągłego spalania płomieniowego, D — obszar żarzenia się, L — grubość warstwy drewna, a — współczynnik wyrównywania temperatury, c — ciepło właściwe drewna,  $\rho$  — gęstość drewna,  $Q_R$  — energia promieniowania doprowadzona w czasie do jednostki pola powierzchni drewna

Warunki powstania zapłonu oraz występowania różnych postaci spalania drewna przedstawiono na rys. 9.37, który zawiera wykres korelujący wartości jednostkowej energii promieniowania wyrażonej przez stosunek  $\frac{Q_R}{\rho c L}$ , z liczbą Fouriera  $\frac{a\tau}{L^2}$ ,

gdzie:  $Q_R$  — energia promieniowania doprowadzona do jednostki powierzchni warstwy drewna do jednostki powierzchni warstwy drewna o grubości L w czasie  $\tau$ ,  
 $\rho$  — gęstość drewna,  
 $c$  — ciepło właściwe drewna,  
 $a$  — współczynnik wyrównywania temperatury w drewnie.

Liczba Fouriera określa warunki rozchodzenia się ciepła w warstwie drewna, co wpływa na wystąpienie tam temperatury wyższej od temperatury zapłonu.



Stosunek  $\frac{Q_R}{qcL}$  ma wymiar temperatury, co należy rozumieć, że jego wartość określa temperaturę, do której teoretycznie można ogrzać warstwę drewna w wyniku doprowadzenia do niej energii  $Q_R$ .

Na wykresie linią ciągłą, której położenie zależy od grubości warstwy, rozdzielono obszary, w których występuje lub nie występuje zapłon. Linia przerywana natomiast wyznacza granicę między spalaniem ciągłym i krótkotrwałym. Zapłon nie występuje, gdy ilość jednostkowej energii promieniowania jest za mała (małe  $\frac{Q_R}{qcL}$ ) lub czas jej doprowadzania za duży (duża wartość liczby Fouriera).

W obszarze spalania krótkotrwałego ciepło jest doprowadzone tak szybko, że wierzchnia warstwa drewna zostaje rozłożona termicznie i zapalona zanim wskutek przewodzenia zostaną ogrzane następne warstwy. Spalanie kończy się, ponieważ rozkład termiczny niższych warstw jest powolny, a chłodzenie rozżarzonej warstwy wierzchniej w wyniku promieniowania i konwekcji bardzo intensywne.

W górnej części wykresu, co odpowiada dużym wartościom jednostkowej energii promieniowania, występuje płomieniowe spalanie ciągłe, które w pobliżu granicy zapłonu przechodzi w żarzenie.

Budynek, jako przedmiot spalania, zawiera najrozmaiciej ukształtowane i na ogół połączone ze sobą elementy materiału palnego. W związku z tym rozprzestrzenianie się płomienia nie napotyka tam trudności i dlatego jest zagadnieniem tak kłopotliwym do opanowania.

W przeciwieństwie do budynków, las składa się z elementów palnych — pni, rozdzielonych w sposób przypadkowy i połączonych tylko i to nie zawsze, na dole poszyciem, a na górze gałęziami i listowiem.

Pożar w lesie przemieszcza się przeważnie po poszyciu i niszczy wiele dużych drzew nadpalając ich pnie. Czasami spalanie obejmuje także konary i gałęzie. W rzadkich przypadkach pożar może się przerzucać z jednej korony drzewa na drugą, nie powodując zapłonu poszycia.

Ogrzewanie drzew niezapalonych odbywa się przez konwekcję i promieniowanie. Powoduje ono najpierw suszenie, a potem rozkład termiczny liści, gałęzi i wreszcie pnia. Produkty rozkładu termicznego tworzą z powietrzem palną mieszanę, która przy odpowiedniej koncentracji zapala się. W ten sposób w jednej chwili mogą być objęte płomieniem od razu całe korony drzew. Czasami takie zapłony mają charakter wybuchowy. W pełni rozwinięty pożar lasu charakteryzuje się pióropuszem płomieni i dymu oraz unoszącymi się w górze płonącymi liśćmi i gałązkami.

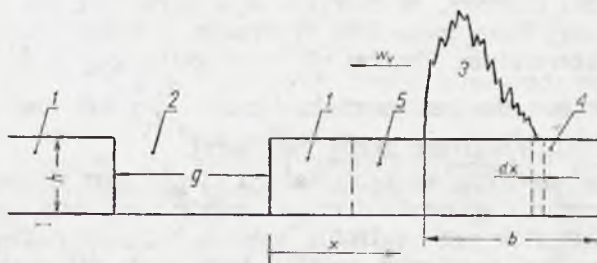
Dym nie tylko hamuje wszelkie operacje zmierzające do stłumienia ognia, lecz również zaciemnia czoło pożaru i utrudnia dokonywanie zdjęć lotniczych bardzo przydatnych w późniejszych analizach.

Płomień w pióropuszu, w zależności od kierunku i charakteru wiatru oraz ruchów konwekcyjnych i charakteru wiatru oraz ruchów konwekcyjnych powietrza i spalin jest zdmuchiwany lub rozniecany. Promieniowanie płomienia wywiera znaczny wpływ na ogrzewanie, suszenie i rozkład termiczny znajdującego się w pobliżu paliwa, co decyduje o kierunku przemieszczania się pożaru.

Rysunek 9.38 przedstawia model pożaru lasu. Obszar spalania, nad którego przednią częścią unosi się płomień, rozprzestrzenia się z szybkością  $w_v$ . Szerokość tego obszaru wynosi

$$b = \frac{M_F w_v}{m} \quad [9.45]$$

gdzie:  $M_F$  — masa paliwa przypadająca na jednostkę powierzchni lasu,  
 $m$  — masowa szybkość spalania w jednostkach masy paliwa na jednostkę czasu.



Rys. 9.38. Model rozprzestrzeniania się pożaru w lesie: 1 — obszar zadrzewiony, 2 — przerwa w zadrzewieniu (np. linia ostępowa), 3 — płomień, 4 — obszar objęty żarem, 5 — obszar podgrzewania paliwa,  $h$  — wysokość lasu,  $g$  — szerokość przerwy w zadrzewieniu,  $b$  — szerokość obszaru objętego pożarem

Warunkiem przemieszczania się pożaru z szybkością  $w_v$  jest spełnienie równości

$$Q = M_F c (T_z - T_0) w_v \quad [9.46]$$

gdzie:  $Q$  — ciepło przeniesione z pożaru do strefy ogrzewania,  
 $c$  — ciepło właściwe materiału palnego,  
 $T_z$  — temperatura zapłonu materiału palnego,  
 $T_0$  — temperatura początkowa materiału palnego.

Zakłada się, że ciepło  $Q$  zależy wykładniczo od szybkości rozprzestrzeniania się obszaru spalania lub jego szerokości

$$Q = Q_R (1 - e^{-\alpha b}) \quad [9.47]$$

gdzie:  $Q_R$  — ciepło dostarczone ze strefy spalania na drodze promieniowania,  
 $\alpha$  — współczynnik uwzględniający inne niż promieniowanie sposoby przechodzenia ciepła z obszaru spalania do obszaru podgrzewania paliwa (konwekcja i przerzuty palących się gałęzi),  
 $e$  — podstawa logarytmu naturalnego.

Łącząc prawe strony równań [9.46] i [9.47] otrzymuje się

$$Q_b (1 - e^{-\alpha b}) = M_F c (T_z - T_0) w_v \quad [9.48]$$

Rozwiązanie tego równania przedstawiono na rys. 9.39, który zawiera wykres z naniesioną krzywą zależności

$$B = f\left(\frac{M_F w_v}{m}\right) \quad [9.49]$$

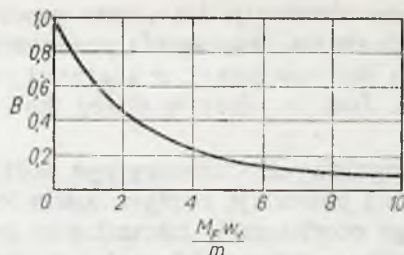
gdzie:  $B = \frac{mc(T_z - T_0)}{\alpha Q_b}$  — wielkość charakteryzująca właściwości pożaru,

$\frac{M_F w_v}{m}$  — szerokość obszaru spalania, która jest miarą prędkości przemieszczania się płomienia.

Wartość  $B$  zmienia się w lesie od punktu do punktu i dlatego czoło pożaru przemieszcza się bardzo nieregularnie.

Aby stłumić pożar, należy zwiększyć  $B$  (na przykład lejąc wodę lub sypiąc piasek) albo wyciąć przerwę między drzewami.





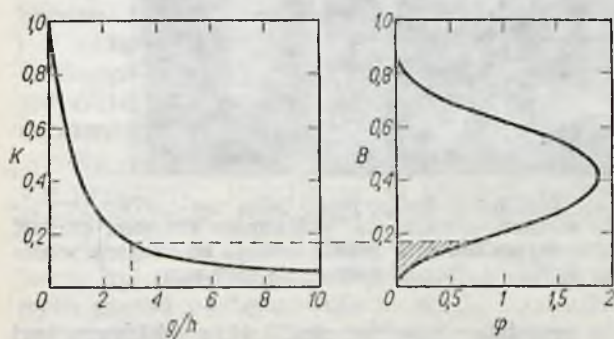
Rys. 9.39. Zależność wyrażenia  $B$  charakteryzującego właściwości pożaru od prędkości przemieszczania się płomienia (która jest proporcjonalna do szerokości obszaru spalania)

Ilość ciepła, która przejdzie przez taką przerwę na drugą stronę, będzie zależała od jej szerokości. Warunek przeskoku pożaru określa więc nierówność

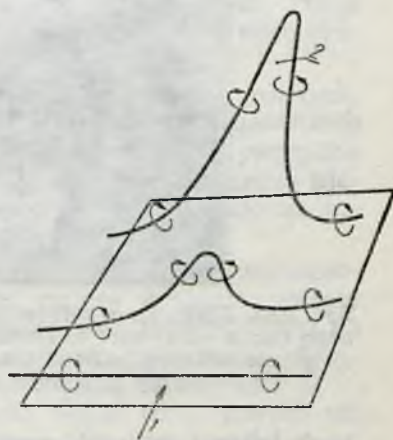
$$K \geq B \quad [9.50]$$

gdzie  $K$  jest ułamkiem energii cieplnej  $Q$ , która przedostała się przez przerwę.

Zależność  $K$  od szerokości przerwy (ściślej od stosunku szerokości przerwy do wysokości lasu) przedstawiono na rys. 9.40. Na tym samym rysunku podano także gęstość rozkładu liczby  $B$  na powierzchni lasu. Przyjmując określoną szerokość przerwy można wyznaczyć prawdopodobieństwo przeskoku przez nią pożaru, które równa się zakreskowanej części pola powierzchni pod krzywą gęstości rozkładu.



Rys. 9.40. Metoda wyznaczenia prawdopodobieństwa przeskoku płomienia przez przerwę w lesie:  $K$  — ułamek energii cieplnej  $Q$ , która przedostała się przez przerwę,  $g$  — szerokość przerwy,  $h$  — wysokość lasu,  $B$  — wielkość charakteryzująca właściwości pożaru,  $\varphi$  — udział powierzchni lasu o właściwościach pożarowych  $B \div B + dB$ . Prawdopodobieństwo przeskoku płomienia przez przerwę równa się stosunkowi pola powierzchni zakreskowanej do całej powierzchni pod krzywą rozkładu

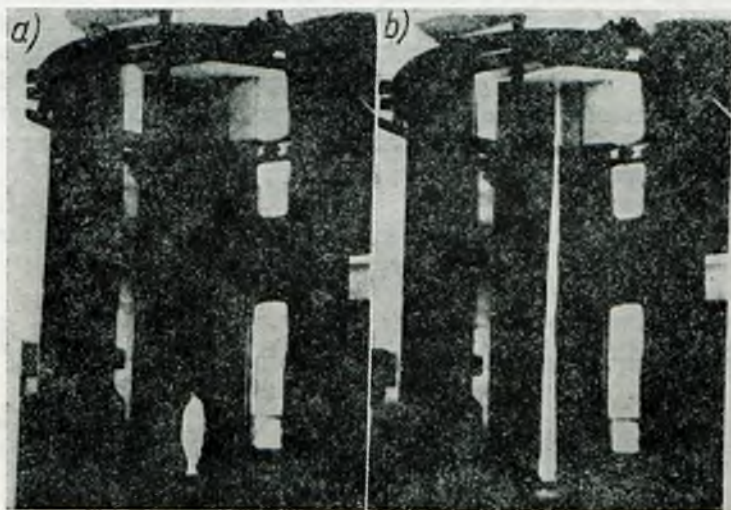


Rys. 9.41. Powstanie wirów ogniowych podczas pożaru lasu: 1 — kierunek wiatru, 2 — płomień

Podczas pożaru lasu obserwuje się często powstanie „wirów ogniowych” przyczyniających się do zwiększenia prędkości przemieszczania się pożaru i wywołujących zapłony nawet w znacznej odległości od zasadniczego obszaru spalania. Jest to jakby w dużej skali model spalania turbulentnego.

Powstanie wirów ogniowych tłumaczy rys. 9.41. Wznoszący się nad obszarem pożaru płomień powoduje odpływ spalin ku górze i w związku z tym ruch otaczającego powietrza w kierunku do środka płomienia. Podobne ruchy, ale już tylko z jednego kierunku mogą być oczywiście spowodowane także wiatrem. Dolne warstwy tego przepływającego powietrza wskutek hamującego oddziaływania wierzchołków drzew zostają wprowadzone w ruch wirowy. Część tych wirów opływając płomień chwytają z niego pewną ilość palącej się mieszanki i przerzucają ją w dalsze rejony.

W pewnych szczególnych przypadkach, przy niesymetrycznym odpływie, płomień może być wraz z warstwą przyległego powietrza wprowadzony w powolny ruch obrotowy, który, w wyniku działania sił odśrodkowych, utrudnia dyfuzję tlenu z otoczenia i w związku z tym znacznie zwiększa jego długość. To bardzo interesujące zjawisko (zrealizowane w warun-



Rys. 9.42. Zjawisko wydłużania się płomienia dyfuzyjnego jako następstwo powolnego ruchu wirowego: a) spalanie acetonu w naczyniu o średnicy 100 mm, długość płomienia 450 mm, b) powietrze otaczające ten sam palnik zostało wprowadzone w powolny ruch obrotowy ( $0,075^{-1}$ ), długość płomienia 4500 mm

kach laboratoryjnych) zostało przedstawione na rys. 9.42, na którym jest widoczny dziesięciokrotny wzrost długości płomienia po wprowadzeniu go w powolny ruch wirowy.

W warunkach rzeczywistych pożarów, płomienie tego rodzaju osiągają wysokość kilometra i więcej. Powietrze do takiego płomienia-kolosa może być doprowadzone tylko z dołu, gdzie hamujący wpływ ziemi niewieczy ruch wirowy i działanie jego siły odśrodkowej. Prędkości powietrza w tym miejscu mogą osiągnąć znaczne wartości. Prowadzi to do powstania wiatru o sile huraganu, który przewraca drzewa.



## ZAKOŃCZENIE

Głównym zadaniem teorii procesów spalania, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, jest podanie prawidłowych pod względem fizycznym wyobrażeń o przebiegu tych procesów w konkretnych warunkach technicznych, czyli zrozumienie ich.

Wyrażenie „zrozumieć proces fizyczny” ma rozmaite znaczenia, co wynika z różnych poziomów „rozumienia”. Na ogół wymienia się cztery poziomy rozumienia procesów fizycznych:

1. opis jakościowy procesu;
2. posiadanie danych eksperymentalnych w szerokim zakresie warunków, które są skorelowane z odpowiednimi zmiennymi. Umożliwia to ilościowe przewidywanie wydarzeń w nowych warunkach;
3. analiza procesu, to jest rozczłonkowanie go na elementy proste, z których każdy może być opisany matematycznie za pomocą makroskopowych praw fizycznych;
4. znany jest los wszystkich cząsteczek i atomów biorących udział w procesie oraz ich wzajemne oddziaływanie. Proces może być więc opisany na poziomie mikroskopowym.

Spalanie jako proces fizykalno-chemiczny, występuje w różnych, bardzo różniących się pod względem konstrukcyjnym urządzeniach i w związku z tym obejmuje ogromną liczbę zagadnień. Jako dyscyplina naukowa natomiast jest dziedziną bardzo obszerną ale także bardzo niejednorodną, pod względem stosowanych metod badania oraz poziomu rozumienia poszczególnych zjawisk.

Szeroko stosowane i często doskonale spełniające swoje przeznaczenie urządzenia techniczne, w których zachodzi proces spalania zostały opracowane w olbrzymiej większości przez praktyków. Wpływ nauki na rozwój tych urządzeń, nawet tak stosunkowo nowych, jak silniki odrzutowe, był niewielki i przejawiał się raczej w przejęciu od fizyków pewnych metod postępowania w czasie prowadzenia badań rozwojowych niż w pedantycznej analizie zachodzących tam procesów.

Komory spalania i paleniska znajdują się jednak na ogół już na tak wysokim poziomie rozwoju technicznego, że dalsze ich doskonalenie bez interwencji nauki jest niemożliwe.

Względy ekonomiczne oraz ogólna tendencja rozwojowa urządzeń, w których zachodzi spalanie to jest przede wszystkim wzrost mocy silników, wzrost wydajności kotłów oraz wzrost przepustowości pieców doprowadziły do skrytalizowania się dwu podstawowych wymagań stawianych komorom spalania i paleniskom: wysoka sprawność oraz duża intensywność spalania czyli duże obciążenie cieplne jednostki objętości.

Wskutek tych wymagań, przy projektowaniu nowych urządzeń, doszło do tak znacznego zagęszczenia problemów, że ich poprawne rozwiązanie w oparciu o intuicję i rutynę projektanta jest mało prawdopodobne. Korzystanie przy tym ze wzorów empirycznych, ze względu na ich ograniczony zakres stosowności, jest na ogół nieskuteczne. Jeśli projektant ma dostęp do jakiegoś wzorca to może z tego skorzystać stosując przy ustalaniu zasadniczych wymiarów i parametrów urządzenia metody modelowania. Jeśli nie, pozostaje mu oprzeć się na szczegółowej analizie procesów oraz aerodynamicznych i termodynamicznych obliczeniach.

Gdy projektowane urządzenie zawiera elementy rzeczywiście nowe proces powstawania konstrukcji nie może obyć się bez badań. Wyrazem tego jest organizowanie przy biurach konstrukcyjnych własnych laboratoriów.

Dążenie do intensyfikacji procesów spalania realizuje się przez stosowanie dużych prędkości przepływu (nawet naddźwiękowych, co znalazło zastosowanie w komorach spalania hiperdźwiękowych silników strumieniowych) oraz wysokich temperatur i ciśnień. Zwiększone ciśnienia zaczęto stosować nawet w paleniskach kotłowych.

Inny kierunek rozwoju palenisk polegający na ich przystosowaniu do pracy na paliwo zawierające dużo wilgoci oraz popiołu jest podyktowany względami ekonomicznymi.

Wysokosprawne i silnie obciążone cieplnie komory spalania wymagają, aby ich przestrzeń robocza była właściwie i skrupulatnie wykorzystana, a wszystkie zjawiska w niej zachodzące przebiegały w sposób z góry założony. Dokonuje się tego przez odpowiednie ukształtowanie przepływu czyli odpowiedni dobór rozkładu prędkości w komorze, który kontroluje inne procesy, jak tworzenie mieszanki oraz stabilizację i rozprzestrzenianie się płomienia. Występująca w procesie spalania jonizacja produktów reakcji w pewnym stadium ich przeobrażania, stwarza dodatkową szansę kontroli tego procesu za pomocą pola elektromagnetycznego.

Najbardziej perspektywiczną właśnie wydaje się możliwość wykorzystania efektów, które występują w spalaniu, poza wywiązywaniem się ciepła. Na tym opierają się nasze nadzieje na zrealizowanie urządzeń służących do bezpośredniej przemiany energii chemicznej zawartej w paliwie w elektryczną (generatory magnetogazodynamiczne i ogniwa paliwowe) lub energię promieniowania (lasery chemiczne).



## LITERATURA

### Książki z dyscyplin nawiązujących do problematyki spalania

1. *Bennett C. O. i Myers I. E.*: Przenoszenie pędu, ciepła i masy (tłum. z angielskiego). Warszawa 1967. WNT.
2. *Hirschfeld I. O., Surtiss C. F. and Bird R. B.*: Molecular Theory of Gases and Liquids. New York 1954, John Wiley.
3. *Johnstone R. E. i Thring M. W.*: Instalacje, doświadczalne modele i metody powiększania skali (tłum. z angielskiego). Warszawa 1960. WNT.
4. *Landau L. i Lifszic E.*: Mechanika ośrodków ciągłych (tłum. z rosyjskiego). Warszawa 1958. PWN.
5. *Ochęduszek S.*: Termodynamika stosowana. Warszawa 1964. WNT.
6. *Паушкин Я. М.*: Химия реактивных топлив. Москва 1962. Изд. Акад. Наук СССР.
7. *Penner S. S.*: Chemistry Problems in Jet Propulsion. New York 1957, Pergamon Press.
8. *Roga B., Wnękowska L.*: Analiza węgla i koksu. Warszawa 1966. WNT.
9. *Tomasik Z.*: Paliwa sztuczne i właściwości paliw. Wrocław 1953. PWN.
10. *Wiśniewski S.*: Podstawy termodynamiki silników spalinowych. Warszawa 1963. WNT.
11. *Wójcicki S.*: Zasady eksperymentu. Warszawa 1964. MON.

### Książki z teorii spalania

12. *Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер В. Н.*: Физика взрыва. Москва 1959. Госуд. Издат. Физ.-Матем. Литер.
13. *Bone W. A. i Townend D. T. A.*: Flame and Combustion in Gases. New York 1927. Longmans, Green and Co.
14. *Fristrom R. M. i Westenberg A. A.*: Flame Structure. New York 1965. McGraw-Hill.
15. *Gaydon A. G. i Wolfhard H. G.*: Flames. London 1960. Chapman and Hall.
16. *Gaydon A. G.*: The Spectroscopy of Flames. London 1957. Chapman and Hall.
17. *Хитрин Л. Н.*: Физика Горения и Взрыва. Изд. Московского Университета. 1957.
18. *Jost W.*: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin 1939. Julius Springer.
19. *Кнорре Г. Ф.*: Теория топочных процессов. Москва 1966. Издат. Энергия.
20. *Кнорре Г. Ф.*: Топочные процессы. Москва 1959. Государ. Энергетическое Издат.
21. *Lewis B. i Elbe G.*: Combustion, Glames and Explosions of Gases. New York 1961. Academic Press.
22. *Lewis B., Pease R. N. i Taylor H. S.*: Combusion Processes. Princeton 1956. Princeton University Press.
23. *Лавров Н. В., Шурыгин А. П.*: Введение в теорию горения и газификации топлива. Москва 1962. Издат. Академии Наук СССР.
24. *Markstein G. H.*: Non — steady Flame Propagation Oxford 1964. Pergamon Press.

25. Roga B. i Węglowska M.: Fizykochemia procesu spalania węgla i gazu. Warszawa 1956. PWT.
26. Соколик А. С.: Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. Москва 1960. Издат. Академии Наук СССР.
27. Spalding D. B.: Some Fundamentals of Combustion. Oxford 1956. Pergamon Press.
28. Щелкин К. Н., Тролин А. К.: Газодинамика горения. Москва 1963. Издат. Акад. Наук СССР.
29. Щетников Е. С.: Физика горения газов. Москва 1965. Издат. Наука.
30. Smith M. L. i Stinson K. W.: Fuels and Combustion. New York 1952. McGraw-Hill.
31. Солоухдин Р. И.: Ударные волны и детонация в газах. Москва 1963. Государ. Изд. Физ.-Мат. Литературы.
32. Weinberg F. I.: Flame Processes. London 1960. Imperial College of Science and Technology.
33. Weinberg F. I.: The Optics of Flames. London 1962 Butterworth.
34. Williams F. A.: Combustion Theory. Reading, Massachusetts 1965. Addison — Wesley.
35. Vulis L. A.: Thermal Regimes of Combustion. New York 1961. McGraw-Hill.
36. Войцеховский Б. В.: Структура фронта детонации в газах. Новосибирск 1963. Изд. Сибирского отделения АН СССР.
37. Зельдович Я. В.: Теория детонации. Москва 1955. Государст. Издат. Техничко-Теоретической Литературы.
38. Becher U.: Der Gasbrenner, Berlin 1957. VEB. Verlag Technik.
39. Bernhardt M.: Teoria silników spalinowych tłokowych, Warszawa 1963. WNT.
40. Gumz W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff und Feuerungstechnik. Berlin. 1953. Pringer.
41. Ильяшенко С. М.: Теория и расчет прямоточных камер сгорания. Москва 1964. Изд. Машиностроение.
42. Корабин А. Н.: Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. Изд. Металлургия. 1966.
43. Карпов В. П.: Горение газообразных смесей в двигателях. Машгиз. 1951.
44. Niewiadomski S.: Piece w przemyśle chemicznym i przemysłach pokrewnych. Warszawa 1961. PWT.
45. Orłowski P.: Kotły parowe. WNT.
46. Пчелкин Ю. М.: Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва 1967. Изд. Машиностроение.
47. Раушенбах Б. В.: Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Машиностроение. 1964.
48. Reinders H.: Zastosowanie paliw płynnych w ogrzewnictwie (tłum. z niem.). Warszawa 1966. Arkady.
49. Reynst F. H.: Pulsating Combustion. Oxford 1961. Pergamon Press.
50. Sitkei G.: Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Berlin 1964. Springer.
51. Thring M. W.: The Science of Flames and Furnaces. London 1962. Chapman and Hall.
52. Воинов А. Н.: Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях. Машиностроение. Москва 1965.
53. Wójcicki S.: Silniki pulsacyjne, strumieniowe i raketowe. Warszawa 1962. MON.
54. Wróblewski T., Pepłowski A. i Górecki H.: Urządzenia kotłowe. Warszawa 1960. PWT.

## Symposiumy poświęcone teorii spalania

55. First Combustion Symposium. The Combustion Institute 1965.
56. Second Combustion Symposium. The Combustion Institute 1965.
57. Third Symposium on Combustion, Flames and Explosion Phenomena. Baltimore 1949. Williams and Wilkins.
58. Fourth Symposium (International) on Combustion. Baltimore 1953. Williams and Wilkins.
59. Fifth Symposium (International) on Combustion. New York 1955. Reinhold Publishing Corporation.
60. Sixth Symposium (International) on Combustion. New York 1957. Reinhold Publishing Corporation.
61. Seventh Symposium (International) on Combustion. London 1959. Butterworth.



62. Eighth Symposium (International) on Combustion, Baltimore 1962. Williams and Wilkins.
63. Ninth Symposium (International) on Combustion, New York 1963. Academic Press.
64. Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institut 1965.
65. Eleventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institut 1967.

## Monograficzne publikacje zbiorowe

66. Basic Consideration in the Combustion of Hydrocarbon Fuels with Air. Cleveland 1967. Lewis Flight Propulsion Laboratory.
67. Combustion and Propulsion (Noise, Shock Tubes, Magnetic Effects, Instability and Mixing). New York 1958. Pergamon Press.
68. Combustion Research and Reviews. London 1955. Butterworth.
69. Detonation and Two-Phase Flow. New York 1962. Academic Press.
70. Experimental Methods in Combustion Research. New York 1961. Pergamon Press.
71. Explosion, Detonation, Flames, and Ignition. New York 1959. Pergamon Press.
72. Progress in Combustion Science and Technology. Oxford 1960. Pergamon Press.
73. Selected Combustion Problems: Fundamentals and Aerodynamic Applications. London 1954. Butterworth.
74. Selected Combustion Problems. II. Transport Phenomena, Ignition, Altitude Behaviour and Sealing of Aeroengines. London 1956. Butterworth.





# SKOROWIDZ RZECZOWY

## A

acetylen, otrzymywanie 17

## B

biegun strugi 99  
bilans energetyczny 88

## C

cechy charakterystyczne paliw stałych 80  
— i klasyfikacja procesów spalania 39  
— płomienia 16  
charakterystyka rozpylacza z upustowym sterowaniem 171  
— spalania przy dysocjacji 66  
charakterystyki komory spalania 47  
— spalania materiałów pędnych 59  
ciepło parowania strumienia ciepłego 210  
— spalania paliw 55, 56, 57, 74  
ciśnienie i temperatura czynnika roboczego w cylindrze 12  
— w okresie spalania 369  
czas do spalania kropli 353  
— indukcji w procesie samozapłonu 226  
— opóźnienia zapłonu 232  
— relaksacji komory spalania 305  
czoło płomienia 10, 253, 271, 275, 355

## D

deflagracja Chapmana-Jougueta 244, 245  
deformacja profilu strugi 110  
detonacja Chapmana-Jougueta 244  
— spinowa 274, 275  
długość płomienia w piecu martenowskim 360  
— strefy cyrkulacji 113  
dno komory roboczej pieca fluidyzacyjnego 21  
dodatek gorących spalin — wpływ 388  
drżania samowzbudne w układzie 303  
— w przewodzie cylindrycznym 306  
dyfuzja molekularna 143, 144  
dysocjacja termiczna 63

dyspersja warstwy 131  
dysz wlotowych usytuowanie 119

## E

efekt Magnusa 199  
— termiczny mieszanek po spalaniu 75  
efekty uboczne w procesie spalania 12  
egzergia materii 88  
— mieszanki palnej 91  
energia aktywacji 64, 65  
— chemiczna 71  
— dyssypacji 136  
— iskry minimalna 362  
energetyczne własności materiałów pędnych 75

## F

fala detonacyjna 13, 270, 363

## G

gaźnik silnika 153  
generator magnetogazodynamiczny 27  
generowanie fal ciśnienia 269  
geometria czoła płomienia 12  
gęstość energii pulsacji 127  
gęstości i współczynniki lepkości 184  
głębokość penetracji strugi 109  
głowica wtryskowa komory spalania 154  
granica dymienia 27  
— samozapłonu ciepłego 229  
— zapłonu mieszanki 236, 237, 238, 242  
— zdmuchnięcia płomienia 288

## I

ilość ciepła doprowadzona do kropli 353  
intensywność turbulencji 40, 137, 140, 155

## J

jakość rozpylenia 183

## K

kąt rozpylenia cieczy 200, 204  
— strugi wypadkowej 155

kąt wierzchołkowy w stożku spalania 10  
 kinetyczne własności mieszanki palnej 75  
 komora wirowa strugi 116  
 — żuźlowe 15  
 komory spalania 21, 44, 372, 375  
 koncentracje związków chemicznych 343  
 kontrola przebiegu procesu spalania 11  
 koroidalna komora spalania 24  
 kratownice turbulizujące przepływ 133  
 krople w żagwi 180  
 kruszność do przemiału 85  
 kryteria do klasyfikacji procesu spalania 43  
 kryterium Michelsona 292  
 — Reyleigha 303  
 krytyczna średnica wygaszania 238, 257  
 krzywa Rankina-Hugoniota 243, 244  
 — destylacji dla benzyny, nafty i oleju 83

## L

lepkość odpływającego żuźla 87  
 liczba Karmana — intensywność turbulencji 126  
 — koksowa wg Condradsona 86  
 — Laplace'a 184  
 — Nusselta 212  
 — oktanowa 77  
 — podobieństwa Semienowa 377, 378  
 — — Sherwooda 149, 198  
 — Prandtla, Schmidta i Lewisa 145  
 — Webera 183  
 — węglowa 57  
 linie Fanno 97

## M

masa cieczy parującej z jednostki długości 215, 216  
 — molowa spalin 75  
 materiały pędne stałe 35  
 metoda Martensa-Penksey'ego — określenie temperatury zapłonu 8  
 — opisu turbulencji Eulera i Lagrange'a 126, 130  
 model tworzenia mieszanki 216  
 moment ilości ruchu strugi 114

## N

nagaru — zdolność tworzenia 86  
 nasycenie cieplne strugi 296  
 natężenie przepływu 6, 101, 163  
 nawilżanie mialu węgla kamiennego 84

## O

obciążenie cieplne komory spalania 45, 46  
 — — pola przekroju palnika 334  
 objętość spalin 60

obszar rozpadu powłok cieczy 184  
 — występowania samozapłonu 228  
 ocena doskonałości procesu spalania 88  
 oddziaływanie spalin na ścianki komory 78  
 okresy charakterystyczne w procesach spalania 26  
 opóźnienia zapłonu chemiczne 76  
 oscylacje ciśnienia w procesie spalania 273  
 oznaczenie reakcyjności węgla 82

## P

palenie się kropli — model 351  
 — — pozostałości koksowej 33  
 paleniska 31, 34, 188, 190, 191, 192, 193, 196  
 palnik 6, 13, 14, 18, 19, 34, 86, 195, 321, 323, 324, 330, 333, 345  
 paliw polepszenie stabilności 81  
 paliwa — wymagania 54  
 parametry rozpylania 205  
 parametry termodynamiczne powietrza i paliwa w cylindrze 26  
 — turbulencji w przewodzie 136  
 piec fluidyzacyjny do prażenia 20  
 — martenowski 15  
 plazma 346  
 płomień dyfuzyjny 13, 14, 18, 320  
 — laminarny 254, 324, 325, 326  
 — śpiewający 306  
 podgrzew przedwybuchowy 225  
 podobieństwo elementarnych zjawisk spalania 6  
 podwarstwa laminarna 147, 148  
 podział paliw 187  
 pole powierzchni komory spalania-obliczenie 46  
 — rozkładu prędkości osiowych 118  
 pompa wtryskowa 156  
 popiół w paliwie 87  
 posiew jonizujący 27  
 potencjały jonizacji pierwiastków 244  
 pożar w lesie 409, 411  
 — zabudowań 408  
 półspalenie 17  
 prawo rozkładu temperatury wzdłuż osi strugi 103  
 prażenie utleniające siarczków 21  
 prędkości fal detonacyjnych 249  
 — obwodowe strugi 114, 116  
 — opadania ziaren paliwa 197  
 — przemieszczania się obszaru spalania 247  
 — przepływu mieszanki 328  
 — przesuwania się rusztu 32  
 — zwrotne w przekroju 112  
 prędkość pulsacji 146  
 — spalania 241, 249, 253, 255, 257  
 proces rozpylania 179  
 — zapłonu 221  
 procesy mieszania, odparowania i spalania-przebieg 3  
 — spalania kontrolowane 41  
 profil prędkości — określenie 99



promieniowanie ciepłe pary 336  
 — fazy gazowej 395  
 przebieg spalania w palenisku war-  
 stwowym 32  
 przekazywanie paliw w zbiornikach  
 81  
 przejście spalania laminarnego w tur-  
 bulentne 322  
 przekazywanie ciepła ze strefy reakcji  
 do mieszanki 42  
 — energii mechanicznej — znaczenie 43  
 przenikanie tlenu ze spalin do metalu  
 16  
 przepływ przez gaźnik silnika 153  
 — — komory wirowe 119  
 — turbulentny 136, 137  
 — w strefie cyrkulacyjnej 112  
 — za ciałem o kształcie nieopływowym  
 111  
 przeskoczenie płomienia 238, 441  
 przydatność węgla do celów technolo-  
 gicznych 80  
 przygotowanie mieszanki do zapłonu 336  
 pulsacje turbulentne 125  
 — w komorach silników 31  
 pyłowe palenisko cyklonowe 33

## R

reakcja chemiczna 64, 66  
 — przedpłomieniowa 77  
 reakcyjność paliwa wobec tlenu 82  
 regeneratory ciepła 14  
 regulacja płomienia dyfuzyjnego 14  
 reguła przekory Le Chateliera-Brauna  
 66  
 relacja między ciepłem właściwym  
 a masą molową 75  
 rozdrobnienie kropli 186  
 rozkład ciśnień w przestrzeni roboczej  
 pieca 17  
 rozkład gęstości strumienia cieczy 201  
 rozkład koncentracji w strudze turbu-  
 lentnej 149, 150  
 — temperatur wg Gaussa 131  
 rozpad cylindrycznej strugi 180  
 rozprzestrzenienie się płomienia 266  
 rozpylacz 151, 160, 169, 170, 173, 175, 177,  
 179, 203  
 rozpylacza kąt rozpylania 164  
 równania dyfuzji i przewodzenia 146  
 — Rankina-Hugeniota 96, 242  
 — ruchu 177, 204  
 — Taylora 131, 132  
 — trajektorii strugi 109  
 — zachowania energii dla mieszanki  
 295  
 — — masy 95  
 ruszt posuwowo-zwrotny 189

## S

samopodobieństwo przepływu strug 133  
 silnik 22, 23, 24, 29, 34

siłownia magnetogazodynamiczna 28  
 skala czasu wg Lagrange'a i Kołmogorowa 130, 132, 136  
 — turbulencji Lagrange'a 264  
 — turbulencji Lagrange'a i Eulera 134  
 — turbulencji w strudze — całkowita 138  
 skład gazów przemysłowych 79  
 — paliw ciekłych i stałych 79  
 — produktów spalania 70  
 składniki inercyjne w mieszance palnej  
 256  
 skrócenie okresu opóźnienia zapłonu 27  
 skrzywienie czoła płomienia 249  
 spadek ciśnienia w komorze 120  
 egzergii termicznej — określenie 89  
 spalanie 10, 24, 36, 262, 304, 313, 319, 337,  
 340, 394, 403  
 sprawność egzergiczna procesu 92  
 — termiczna komory 47  
 — termiczna procesu termodynamicz-  
 nego 88  
 stabilizacja płomienia 275, 278, 282, 287  
 stałe spalania dla paliw 354  
 — równowagi chemicznej 67, 68  
 sterowanie napływu mieszanki 12  
 stopień czystości węgla 8  
 — zadymienia spalin — zależność 53  
 straty paliwa przy wznoszeniu się sa-  
 molotu 84  
 — termiczne spalania 60  
 strefa reakcji 11  
 strefy przebiegające 27  
 struga turbulentna swobodna 99  
 — zawirowana 113  
 struktura płomienia 10, 257, 259  
 strumień cieplny ogrzewający kroplę  
 210  
 — energii akustycznej 302  
 szybkość przebiegu reakcji chemicznej  
 13, 67, 222  
 średnica ziaren węgla a prędkość po-  
 wietrza 197  
 środki tłumiące pożar 406

## T

temperatura mięknięcia popiołu 87  
 — reakcji w płomieniu 13  
 — równowagi parowania 211  
 — rozpylania dla benzyny, nafty i ole-  
 ju 208  
 — samozapłonu 76, 77, 78  
 — spalania 62, 63, 334  
 — pobliżu płonącej powierzchni mate-  
 riału 36  
 — zaplonienia paliw 82  
 — zapłonu 225, 226, 231  
 teoria spalania 54  
 tor kropli — obliczenie 206  
 trajektoria osi strugi — wyznaczenie  
 108  
 trójkąt prędkości przepływu mieszan-  
 ki 11  
 turbulencja jednorodna 127  
 turbulencji eulerowska skala 129

## U

ubytki palenia w spalaniu 61  
układu ustaleczniającego obliczanie 292  
urządzenie do procesów spalania 6  
ustalecznienie płomienia w komorze 111,  
281, 329  
usytuowanie stabilizatorów w komorze  
spalania 293

## W

warunek stabilizacji płomienia 290  
warunki racjonalnego spalania 361  
— termodynamiczne spalania 26  
widmo rozpylenia 182  
wir cyrkulacyjny 113, 125, 129, 311  
własności eksploatacyjne mieszanek 78  
— paliw 55, 71, 207  
wpływ temperatury na ciepło właści-  
we 211  
— temperatury na rozpuszczalność wo-  
dy w benzynie 83  
wskaźnik kruszalności Hardgrove 86  
współczynnik dyfuzji 132, 134, 143, 145  
— korelacji od prędkości pulsacji 128,  
132  
— nadmiaru powietrza 48, 50, 93, 217  
— — utleniacza 61  
— oporu aerodynamicznego 204  
— — siatek w przewodzie 139  
— przechwyty żużla 52  
— strat aerodynamicznych 47, 48  
— szybkości reakcji paliwa 82

współczynnik wywiązywania się ciepła  
46, 49  
wtryskiwacz otwarty 157, 159  
wybuch w przebiegu spalania 24  
wykresy i-s dla niezureagowanej mie-  
szanki palnej 91  
wymiana ilości ruchu, masy i ciepła 102,  
147  
wytlumienie turbulencji 135  
wytwarzanie mieszanki palnej 143

## Z

zabezpieczenie przepływu od oderwań  
121  
zaburzenia w przebiegu spalania 23  
zależność lepkości od temperatury 85  
— temperatury samozapłonu 76  
zapłon za pomocą gorącej powierzchni  
233  
zapotrzebowanie utleniacza 58, 59  
zasięg kropli 205  
zasilanie paleniska 194  
zawartość twardego asfaltu w oleju 86  
— żywic w paliwie 87  
zaworowywacz w komorze spalania 21  
zdolność odparowania paliwa 83  
zerwanie płomienia 289  
zimne płomienie 227  
zjawiska w komorach spalania 124  
zmienność pędu w osiowo-symetrycz-  
nej strudze 104  
zużycie tlenu za stabilizatorem 286  
związek między liczbą oktanową a ce-  
tanową 78





## D O C Z Y T E L N I K Ó W

Doświadczenie z przebiegu konkursu „Czytelnicy mówią o książce technicznej” uzasadnia celowość rozszerzenia tej bezpośredniej formy współpracy Czytelnika z wydawcą. Sprzyja ona nawiązywaniu i umacnianiu więzi wydawcy ze środowiskiem czytelniczym, orientuje w potrzebach, zwraca uwagę na błędy i niedociągnięcia, a ponadto stwarza możliwość wyłaniania z rzeszy czytelniczej kandydatów na opłnłodawców i autorów książek w zakresie tematyki związanej z ich specjalnością i działalnością podstawową.

Zachęcamy więc do udziału w konkursie każdego Czytelnika, w szczególności prosimy o nadesłanie uwag, jakie nasunęły się przy zaznajamianiu się z niniejszą książką.

Wypowiedzi prosimy kierować pod naszym adresem — w miarę możliwości w terminie półrocznym po ukazaniu się książki. Wypowiedzi nadesłane z jakichkolwiek powodów po tym terminie będą również wykorzystane i objęte konkursem.

Po informacje szczegółowe prosimy zwracać się do nas. Regulamin konkursu można otrzymać w każdej Księgarni „Dom Książki”, posiadającej dział książki technicznej.

**KOMISJA UPOWSZECHNIANIA  
KSIĄŻKI I PRASY TECHNICZNEJ  
WARSZAWA, UL. MAZOWIECKA 2/4**

**TEL. 26-82-93**

