

7. SPALANIE PALIW GAZOWYCH

Spalanie gazu stwarza najlepsze możliwości prowadzenia badań procesów spalania w ogóle. Wszystkie zjawiska chemiczne i fizyczne występują wówczas w czystej postaci, ponieważ nie są zakłócone skończonym (w sensie makroskopowym) rozmiarem cząstek biorących udział w reakcji, co występuje przy spalaniu paliw ciekłych i stałych.

7.1. Kinetyka reakcji spalania paliw gazowych

Podstawowym składnikiem większości paliw gazowych są: wodór, tlenek węgla, metan oraz inne węglowodory. Mechanizm reakcji tych składników ma więc istotne znaczenie dla zrozumienia procesu spalania paliw gazowych.

Reakcja wodoru z tlenem

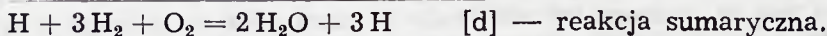
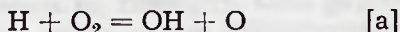


ma charakter łańcuchowy i zaczyna się od reakcji wstępnych powstawania wolnych atomów wodoru



gdzie M oznacza obojętną cząsteczkę gazu lub ścianki naczynia, która bierze udział w zderzeniu, czyli w przekazywaniu energii, ale nie reaguje chemicznie.

Przebieg dalszych reakcji jest następujący



Najwolniejszą z tych reakcji jest reakcja [a], ona też kontroluje szybkość całego procesu, który w związku z tym jest określony zależnością

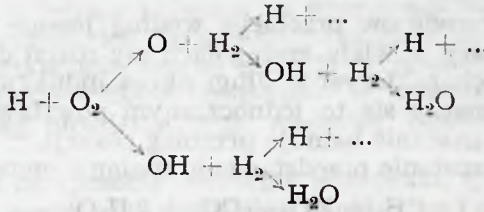
$$u = \frac{dC_{\text{H}_2\text{O}}}{d\tau} = \frac{dC_{\text{H}}}{d\tau} = kC_{\text{H}}C_{\text{O}_2} \quad [7.1]$$

gdzie: $C_{\text{H}_2\text{O}}$, C_{H} , C_{O_2} — koncentracje H_2O , H i O_2 ,
 k — współczynnik proporcjonalności.

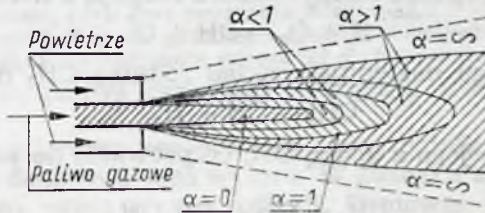
Podstawowymi centrami reakcji łańcuchowej są atomy wodoru, Z reakcji sumarycznej [d] wynika, że wejście w reakcje jednego atomu

H wywołuje pojawienie się trzech nowych. W ten sposób następuje samoprzyspieszenie reakcji.

Przedstawia to poniższy schemat



Na rys. 7.1 podano krzywą zmiany szybkości reakcji w czasie, dla przypadku gdy temperatura jest stała. Charakteryzuje ją typowe dla reakcji łańcuchowych, występowanie okresu indukcji (czasu opóźnienia

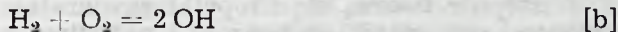


Rys. 7.1. Szybkość łańcuchowej reakcji izotermicznej w czasie: u_0 — szybkość reakcji dająca się praktycznie zauważyć, τ_z — okres indukcji (czas opóźnienia zapłonu)

zapłonu). Czas ten jest zużytkowany na gromadzenie w układzie reagującym takiej koncentracji reagujących centrów, przy której prędkość reakcji osiąga najmniejszą, dającą się praktycznie zauważyć, szybkość u_0 . Następnie szybkość reakcji gwałtownie rośnie, osiąga maksimum, a potem zaczyna spadać w miarę wyczerpywania się składników.

Tlenek węgla zamknięty w zynieniu z tlenem i pozbawiony wilgoci praktycznie nie reaguje do 975°K . Dopiero powyżej tej temperatury zaczyna się ujawniać powolna reakcja heterogeniczna na ściankach naczynia. Przy udziale pary wodnej (do 3%) reakcja staje się homogeniczna i łańcuchowa. Przebiega ona w następujących stadiach:

— początek łańcucha



— rozwój łańcucha



— przerwanie łańcucha na ściankach naczynia



— przerwanie łańcucha we wnętrzu naczynia



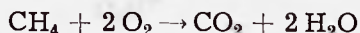
Reakcją kontrolującą cały proces jest łączenie się tlenu węgla z grupą OH [c].

Tę samą funkcję co para wodna może spełniać domieszka wodoru. W tym przypadku początek łańcucha zaczyna się na reakcji [b].

Obecność pary wodnej lub wodoru ma więc przy spaleniu CO zasadnicze znaczenie.

Spalanie węglowodorów przebiega według jeszcze bardziej złożonego mechanizmu, który w wielu szczegółach nie został do tej pory wyjaśniony. Reakcje te charakteryzuje długi okres indukcji rzędu minut lub nawet godzin. Tłumaczy się to jednoczesnym powstawaniem łańcuchów i ich gaszeniem, co znacznie hamuje przebieg reakcji.

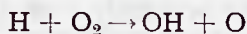
Dla przykładu zostanie przedstawione spalanie metanu



W obecności stanu metan rozkłada się



Powstałe w ten sposób atomy wodoru reagują z tlenem



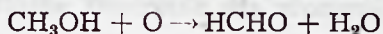
W dalszym ciągu następuje rozkład rodnika CH_3 na CH i wodór



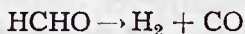
lub łączenie się jego z grupą OH , co prowadzi do powstania alkoholu metylowego



Alkohol metylowy z tlenem tworzy formaldehyd



który ulega rozkładowi



Otrzymany w wyniku wodór i tlenek węgla spala się w sposób opisany poprzednio.

Spalanie metanu i innych węglowodorów komplikuje się wskutek ich termicznego rozkładu. Ciężkie węglowodory rozkładają się na sadzę, metan i wodór. Mechanizm ich spalania sprowadza się więc w poważnym stopniu do mechanizmu homogenicznej reakcji tlenu z metanem i wodorem oraz heterogenicznej reakcji tlenu z węglem.

Rozkład termiczny metanu przebiega następująco.

Najpierw powstają produkty gazowe typu olefin jak acetylen i etylen. Następnie tworzą się kropelki zawierające różne aromatyczne węglowodory poczynając od benzolu i naftaliny, a kończąc na najcięższych olejach. Wskutek dehydratacji węglowodorów kropelki te przekształcają się w cząstki sadzy. Stanowią one zespół nieuporządkowanych kryształów grafitu, między którymi jest rozmieszczony węgiel bezpostaciowy. Poza tym znajduje się tam niewielka ilość wodoru. Skład produktów termicznego rozkładu metanu zależy od temperatury oraz od czasu przebywania w niej. Po dłuższym czasie i w wysokiej temperaturze z metanu otrzymuje się sadzę i wodór. W niższej temperaturze np. rzędu 1650°K i czasie przebywania równym $0,05$ s produktami rozpadu są wyłącznie olefiny. Wystarczy jednak zwiększyć czas dwukrotnie, aby pojawiła się sadza.

Rozkład innych węglowodorów choć jest bardziej złożony ma podobny mechanizm. Zawsze na końcu występują sadza i wodór.

Różnica polega jedynie w składzie produktów przejściowych.

7.2. Spalanie dyfuzyjne

Spalania paliwa gazowego dokonuje się za pomocą palników. Podstawowe funkcje palników polegają na doprowadzeniu odpowiedniej ilości paliwa i utleniacza, ich zmieszaniu oraz stabilizacji czoła płomienia. Poza tym wypełniają one pewne zadania technologiczne, a mianowicie zapewniają określony rozkład temperatur w komorze spalania, określony kształt i zasięg płomienia oraz właściwą intensywność promieniowania.

W zależności od sposobu tworzenia mieszanki, spalanie można dokonywać wg trzech zasad: jako dyfuzyjne, kinetyczne i mieszane.

W ogólnym przypadku całkowity czas spalania wynosi

$$\tau_s = \tau_F + \tau_{ch} \quad [7.2]$$

gdzie: τ_F — czas niezbędny do powstania fizycznego kontaktu między utleniaczem i paliwem, czyli czas tworzenia mieszanki,

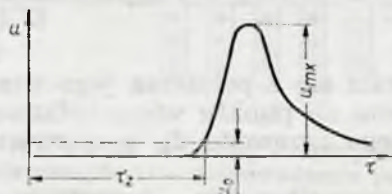
τ_{ch} — czas niezbędny do przebiegu reakcji chemicznej, włączając w to czas potrzebny na nagrzanie mieszanki do temperatury zapłonu.

Przy spalaniu paliwa gazowego występują dwie graniczne możliwości:

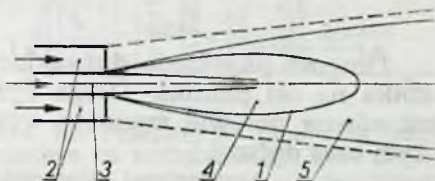
— paliwo i utleniacz przepływają przez palnik niezależnie i zaczynają się mieszać dopiero u jego wylotu. W związku z tym proces spalania jest kontrolowany przez proces dyfuzji. Ponieważ τ_{ch} jest bardzo małe w porównaniu do τ_F więc $\tau_s \approx \tau_F$. Takie spalanie nazywa się dyfuzyjnym,

— paliwo i utleniacz przepływają przez palnik jako uprzednio przygotowana mieszanka. Odpada więc fizyczne stadium procesu ($\tau_F = 0$), a spalanie jest kontrolowane przez reakcję chemiczną ($\tau_s = \tau_{ch}$). Takie spalanie nazywa się kinetycznym.

Poza tymi skrajnymi przypadkami jest możliwy proces pośredni, kiedy wstępnie z paliwem zmieszana jest tylko część utleniacza.



Rys. 7.2. Mieszanie się współosiowych strug w przepływie laminarnym



Rys. 7.3. Struktura dyfuzyjnego płomienia laminarnego: 1 — czoło płomienia, 2 — powietrze, 3 — paliwo gazowe, 4 — mieszanina paliwa i produktów spalania, 5 — mieszanina powietrza i spalin

Spalanie dyfuzyjne w zależności od charakteru przepływu dzieli się na laminarne i turbulентne. To kryterium podziału zostało przyjęte ze względu na różny w obu przypadkach mechanizm tworzenia mieszanki.

Na rys. 7.2 przedstawiono najprostszy palnik składający się z dwu współosiowych przewodów. Przez przewód środkowy płynie paliwo gazowe, a przez zewnętrzny — powietrze. Prędkości przepływu są tak dobrane, że przepływ ma charakter laminarny. Na granicy strug paliwa i powietrza powstaje strefa mieszania będącego następstwem dyfuzji molekularnej.

W miarę oddalania się od palnika strefa mieszania rozszerza się. Jej granicami są: na zewnątrz — struga czystego powietrza, od wewnątrz — struga czystego paliwa. Powierzchnie równych koncentracji mają analogiczny kształt do tych powierzchni w turbulentnej strudze swobodnej (rys. 4.2). Wśród nich znajduje się powierzchnia odpowiadająca składowi stechiometrycznemu ($\alpha = 1$). Stateczne czoło płomienia jest możliwe wyłącznie na tej właśnie powierzchni. W strefie gdzie występuje nadmiar powietrza ($\alpha > 1$), płomień nie może zająć ustalonego położenia, ponieważ naddatek tlenu, dyfundując poza czoło płomienia w strugę paliwa, przynosiłby go tam. Z tej samej przyczyny czoło płomienia nie może ustalić się w obszarze, gdzie panuje nadmiar paliwa ($\alpha < 1$).

Struktura laminarnego płomienia dyfuzyjnego została przedstawiona na rys. 7.3. Czoło płomienia dzieli całą, wypływającą z palnika, strugę na dwa obszary: zawierającą palny gaz oraz zawierającą utleniacz. W wyniku dyfuzji spalin z czoła płomienia w obie strony, powstają w jego pobliżu dodatkowe dwie strefy: mieszaniny paliwa i spalin oraz mieszaniny powietrza i spalin.

Cechą charakterystyczną laminarnego płomienia dyfuzyjnego jest mała szybkość dyfuzji, co znacznie rozciąga płomień i ogranicza intensywność spalania.

Z równania dyfuzji

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} = -D_M F \frac{\partial c}{\partial r} \quad [7.3]$$

gdzie: M — masa dyfundującego gazu,
 F — powierzchnia dyfuzji,
 r — droga dyfuzji,
 D_M — współczynnik dyfuzji molekularnej,
 τ — czas.

można, posługując się metodą analizy wymiarowej, wyznaczyć zależność

$$\tau = \frac{r^2}{D_M} \quad [7.4]$$

Długość płomienia dyfuzyjnego określa się z położenia jego wierzchołka na osi palnika. Droga dyfuzji tlenu do punktu wierzchołkowego jest równa połowie średnicy wewnętrznego przewodu d_0 , a w związku z tym czas dyfuzji

$$\tau \sim \frac{d_0^2}{4D_M} \quad [7.5]$$

Gdy prędkość wypływu paliwa z palnika nie ulega zmianie i równa się w_0 , wtedy długość płomienia wynosi

$$l_p = w_0 \tau = k \frac{w_0 d_0^2}{D_M} \quad [7.6]$$

gdzie k — doświadczalny współczynnik proporcjonalności.

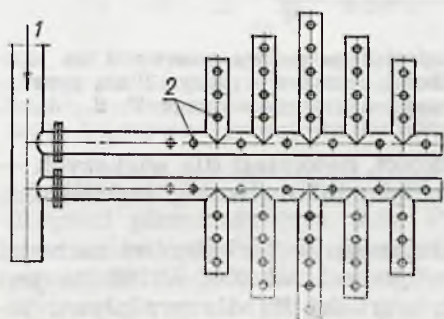
Długość laminarnego płomienia dyfuzyjnego jest więc wprost proporcjonalna do prędkości przepływu paliwa gazowego i kwadratu średnicy przewodu oraz odwrotnie proporcjonalna do współczynnika dyfuzji molekularnej. Wynika stąd, że długość tego płomienia można znacznie zmniejszyć, gdy przy tym samym natężeniu przepływu zastąpi się jeden przewód o dużej średnicy szeregiem przewodów mniejszych. Pewien wpływ na długość płomienia ma także skład paliwa, od którego zależy

teoretyczne zapotrzebowanie powietrza i teoretyczna temperatura spalania. Wzrost obu tych wielkości wydłuża płomień. Im większe jest bowiem teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, tym wolniej tworzy się mieszanka stechiometryczna. Im wyższa natomiast temperatura płomienia, tym mniejsza koncentracja tlenu w pobliżu strefy reakcji.

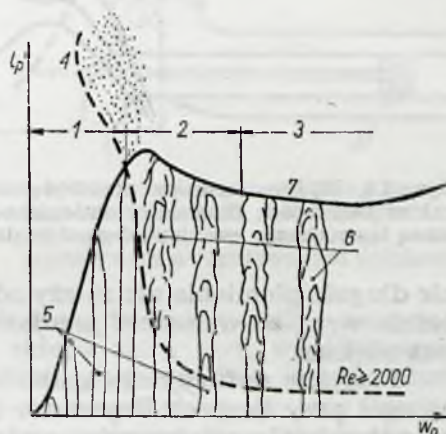
Stosowanie paliw, które podlegają rozpadowi termicznemu zmniejsza sprawność spalania dyfuzyjnego. Zbliżające się do strefy spalania cząsteczki paliwa zostają podgrzane wskutek promieniowania oraz wskutek wymiany ciepła z dyfundującymi od płomienia spalinami i mogą ulec rozpadowi.

Produkty rozpadu węglowodorów sadza i ciężkie oleje spalają się bardzo powoli i część ich w związku z tym nie zdąży przereagować w płomieniu. W wyniku wzajemnego oddziaływania niespalonej sadzy i dwutlenku węgla, w spalinach może wystąpić dodatkowo CO. Udział sadzy w płomieniu łatwo rozpoznać po jasno żółtym świeceniu.

Zastosowanie praktyczne laminarnych płomieni dyfuzyjnych jest bardzo ograniczone. Poza lampami naftowymi i karbidowymi oraz palnikami spirytusowymi stosowane są czasem do ogrzewania naczyń palniki rurkowe (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Palnik rurkowy do podgrzewania naczyń: 1 — doprowadzenie paliwa gazowego, 2 — otwory dla wypływu gazu

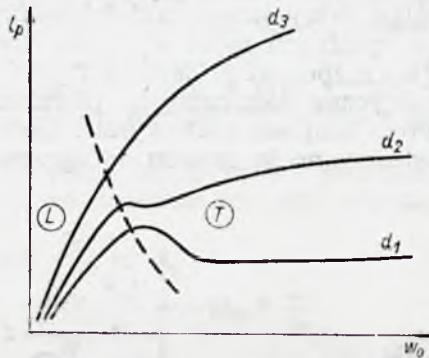


Rys. 7.5. Przejście od płomienia laminarnego do turbulentnego: 1 — obszar płomienia laminarnego, 2 — obszar przejściowy, 3 — obszar płomienia turbulentnego, 4 — granica powstawania turbulencji, 5 — płomień laminarny, 6 — płomień turbulentny, 7 — obwieńdzenia wierzchołków

Na rys. 7.5 przedstawiono przejście płomienia laminarnego w turbulentny. Występują przy tym trzy charakterystyczne obszary: laminarny, przejściowy i turbulentny. W obszarze laminarnym długość płomienia jest praktycznie wprost proporcjonalna do prędkości przepływu (co zgadza się z równaniem [7.6]). Maksimum długości osiąga płomień w obszarze przejściowym, który charakteryzuje się podwójną strukturą płomienia: laminarną u spodu i turbulentną u wierzchołka. Strukturę turbulentną cechuje rozbieżność strugi paliwa gazowego na szereg elementów o zmiennym w czasie kształcie i różnych rozmiarach, pomiędzy którymi znajduje się powietrze. Spalanie zachodzi jednocześnie w całej objętości

na powierzchni poszczególnych elementów. Wolny od spalania jest jedynie wewnętrzny, stożkowy rdzeń gazu palnego o wierzchołku oddalonym od podstawy o $2/3$ długości płomienia turbulentnego.

W miarę wzrostu prędkości przepływu część turbulentna płomienia wydłuża się natomiast część laminarna i całkowita jego długość — skracca. Poczynając od pewnej prędkości, która stanowi granicę obszaru przejściowego i turbulentnego, cały płomień ma praktycznie, poza krótkim odcięciem początkowym, strukturę turbulentną. Charakter krzywej ilustrującej wpływ prędkości przepływu paliwa gazowego na długość płomienia w obszarze przejściowym i turbulentnym zmienia się i zależy od średnicy przewodu doprowadzającego paliwo (rys. 7.6). Dla małych śred-



Rys. 7.6. Wpływ średnicy przewodu doprowadzającego paliwo gazowe d na charakter zależności, długości płomienia od prędkości przepływu paliwa (linią przerywaną zaznaczono granice obszarów: laminarnego L i turbulentnego T , d_1 , d_2 , d_3

nic długość płomienia nie zależy od prędkości, natomiast dla większych — rośnie wraz ze wzrostem prędkości i to tym intensywniej, im średnica jest większa.

Przejście dyfuzyjnego spalania laminarnego w turbulentne zachodzi na ogół przy liczbach Reynoldsa dużo większych od 2000—2200 (to jest od najczęściej spotykanych granicznych wartości Re dla przepływu laminarnego), co tłumaczy się wpływem wysokiej temperatury na gęstość i lepkość gazów. Zmiana gęstości w płomieniu turbulentnym powoduje powstawanie nad nim i wokół niego silnych prądów konwekcyjnych.

Z tych prawdopodobnie powodów liczba Reynoldsa nie stanowi kryterium podobieństwa przy opracowywaniu wyników spalania gazu w strudze swobodnej. Jest nim natomiast stosunek dynamicznego ciśnienia strugi $w_0^2/2$ (wyrażonego w m słupa gazu) do średnicy strugi. Na przykład bezwymiarowa długość płomienia jest określona zależnością

$$\frac{l_p}{d_0} = 20k \left(\frac{w_0^2}{d_0} \right)^{0,17} \quad [7.7]$$

gdzie: l_p — długość płomienia, m,
 d_0 — średnica przewodu, m,
 w_0 — prędkość wypływu paliwa, m/s,
 k — współczynnik zależny od rodzaju paliwa.

Współczynnik k uwzględnia między innymi, wartość teoretycznego zapotrzebowania powietrza przez paliwo gazowe oraz jego współczynniki lepkości i dyfuzji.

Im większe jest teoretyczne zapotrzebowanie powietrza tym na dłuższej drodze zachodzi jego mieszanie się z paliwem i tym dłuższy jest płomień.

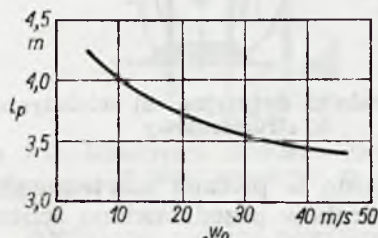
Wpływ współczynników kinematycznej lepkości ν i dyfuzji D na długość płomienia wyraża empiryczna zależność

$$\frac{l_p}{d_0} \sim \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,3} \quad [7.8]$$

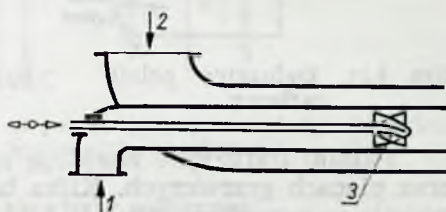
Na długość turbulentnego płomienia dyfuzyjnego wpływa poza tym:

— prędkość, której wzrost przy stałym natężeniu przepływu paliwa gazowego (a więc przy zmniejszającej się średnicy wylotowego przekroju palnika) skraca płomień (rys. 7.7),

— zawirowanie strug paliwa i powietrza, a ściślej kąt, pod którym spotykają się te strugi. Np. zmiana kąta spotkania od 0 do 90° powoduje siedmiokrotne skrócenie płomienia.

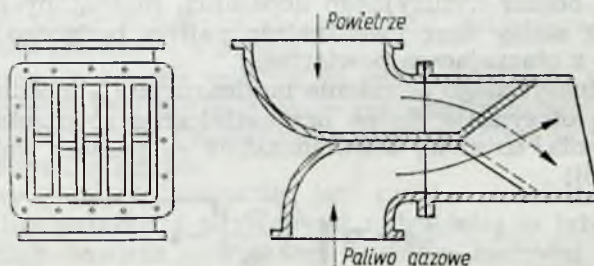


Rys. 7.7. Wpływ prędkości paliwa gazowego na długość turbulentnego płomienia dyfuzyjnego (przy stałym natężeniu przepływu wynoszącym 200 m³/s)



Rys. 7.8. Schemat palnika z regulowaną długością płomienia dyfuzyjnego: 1 — paliwo gazowe, 2 — powietrze, 3 — zawirowywacz o regulowanym położeniu

W oparciu o tę drugą zasadę został zbudowany palnik o zmiennej długości płomienia (rys. 7.8). Palnik składa się z dwu współosiowych przewodów, przy czym przez wewnętrzny płynie paliwo, a zewnętrzny powietrze. W przewod wewnętrzny jest wstawiony przesuwny zawirowywacz. Przesuwając go w głąb przewodu zmniejsza się w przekroju wylotowym palnika kąt zawirowania paliwa, a przez to wydłuża płomień.

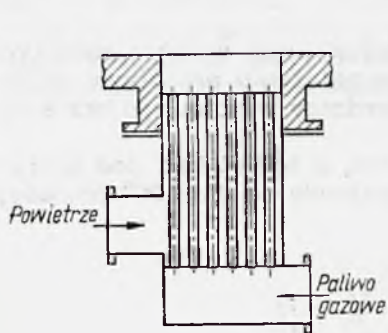


Rys. 7.9. Dyfuzyjny palnik szczelinowy

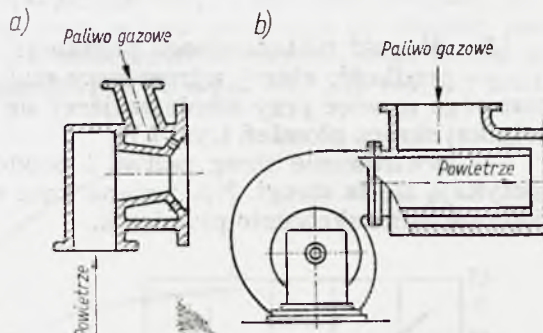
Podczas spalania w dyfuzyjnym płomieniu turbulentnym występują (podobnie jak w płomieniu laminarnym) straty ciepłe spowodowane termicznym rozpadem paliwa, a następnie niepełnym spalaniem sadzy. Ze względu jednak na większe prędkości przepływu i mniejszy, w zwią-

ku z tym, czas oddziaływania wysokiej temperatury na paliwo, straty te w płomieniu turbulentnym są znacznie mniejsze.

Dyfuzyjne spalanie turbulentne stosuje się w przypadkach, gdy warunki pracy wymagają rozciągnięcia płomienia świecącego, aby ułatwić zorganizowanie wymiany ciepła. W celu zwiększenia intensywności promieniowania często w strugę gazu wtryskuje się dodatkowo ciężkie frakcje oleju opałowego.



Rys. 7.10. Dyfuzyjny palnik rurkowy



Rys. 7.11. Palniki dyfuzyjne: a) wielodyszowy, b) strumieniowy

Palniki dyfuzyjne znajdują zastosowanie w piecach martenowskich oraz piecach grzewczych. Kilka takich palników przedstawiono schematycznie na rysunkach 7.9, 7.10 i 7.11.

7.3. Spalanie kinetyczne

Płomienie kinetyczne, podobnie jak dyfuzyjne, dzielą się, w zależności od charakteru przepływu, na laminarne i turbulenty. Struktura tych płomieni oraz niektóre ich charakterystyki omówiono w rozdziale poprzednim.

Kinetyczny płomień laminarny ma wyraźnie zarysowany wewnętrzny stożek o odcieniu niebieskawym oraz słabo świecąca aureolę (rys. 6.13). Powierzchnia stożka jest czołem płomienia laminarnego, aureola natomiast stanowi obszar dyfuzyjnego dopalania, niespalonych w czole płomienia cząstek sadzy oraz ewentualnie paliwa będącego w nadmiarze, które łączy się z otaczającym powietrzem.

Długość kinetycznego płomienia laminarnego l_{p0} można określić z zależności, którą otrzymuje się po przekształceniu równania na normalną prędkość spalania, ustaloną doświadczalnie za pomocą palnika Bunsena (równanie [6.35])

$$l_{p0} = r_0 \sqrt{\left(\frac{\bar{w}}{w_n}\right)^2 - 1} \quad [7.8a]$$

gdzie r_0 — promień palnika (przewodu doprowadzającego mieszankę palną).

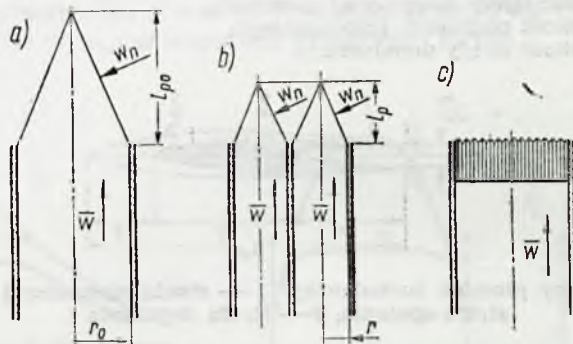
Przy dostatecznie dużych średnich prędkościach przepływu wstępnie przygotowanej mieszanki palnej \bar{w} , gdy spełniony jest warunek $\bar{w} \gg w_n$, powyższe równanie upraszcza się do postaci

$$l_{p0} = \frac{r_0 \bar{w}}{w_n} \quad [7.9]$$

Długość kinetycznego płomienia laminarnego jest więc proporcjonalna do promienia przewodu doprowadzającego mieszanke palną i do jej średniej prędkości przepływu oraz odwrotnie proporcjonalna do normalnej prędkości spalania.

Można przyjąć dla prostoty, że czoło płomienia stanowi boczną powierzchnię stożka geometrycznego (rys. 7.12)

$$F = \pi r_0 \sqrt{r_0^2 + l_{p0}^2} \quad [7.10]$$



Rys. 7.12. Kinetyczne płomienie laminarne: a) palnik jednoprzewodowy, b) palnik wieloprzewodowy, c) palnik do realizacji mikropłomienia

Wydajność cieplną płomienia wyraża wtedy zależność

$$Q = q_p F = q_p \pi r_0 \sqrt{r_0^2 + l_{p0}^2} \quad [7.11]$$

gdzie q_p — jest ilością wywiązującego się ciepła w jednostce powierzchni spalania. Wartość q_p jest proporcjonalna do normalnej prędkości spalania, dla danej mieszanki będzie więc $q_p = \text{const}$.

Taką samą wydajność cieplną Q można uzyskać zastępując palnik jednoprzewodowy palnikiem wieloprzewodowym o odpowiednio mniejszych promieniach przekroju przewodów. Wtedy przy jednakowych wartościach \bar{w} i w_n będzie spełniona równość (rys. 7.12)

$$\frac{r}{r_0} = \frac{l_p}{l_{p0}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad [7.12]$$

gdzie: r , l_p — promień i długość płomienia w palniku wieloprzewodowym,
 n — ilość przewodów w palniku.

Z powyższego równania wynika, że gdy $n \rightarrow \infty$ to r i $l_p \rightarrow 0$. Na tej zasadzie jest oparte mikropłomieniowe spalanie gazu zachodzące na porowatych powierzchniach. Poszczególne pory spełniają w tym przypadku rolę elementarnych palników.

Kinetyczny płomień laminarny jest rzadko stosowany w praktyce, poza niewielkimi palnikami używanymi najczęściej w laboratoriach.

W palnikach bowiem o większej średnicy zachodzi niebezpieczeństwo, że przy małych natężeniach przepływu mieszanki następuje przeskok płomienia do wnętrza palnika.

Na rys. 7.13 przedstawiono schemat kinetycznego płomienia turbulentnego. Można w nim wyróżnić następujące trzy strefy:

- strefa gdzie mieszanka jest jeszcze niespalona,
- strefa spalania, gdzie następuje zapłon i dopalanie około 90% całej ilości mieszanki; cechą charakterystyczną tej strefy jest świecenie;

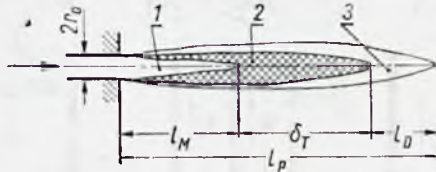
— strefa niewidocznego dopalania, w której zachodzi całkowite zakończenie procesu oraz ostateczne osiągnięcie równowagi termodynamicznej w spalinach.

W przeciwieństwie do płomienia laminarnego, w którym spalanie przebiega w cienkiej warstwie, płomień turbulentny jest rozciągnięty.

Całkowita długość kinetycznego płomienia turbulentnego wynosi

$$l_p = l_M + \delta_T + l_D \quad [7.13]$$

gdzie: l_M — długość strefy niespalonej mieszanki,
 δ_T — szerokość płomienia turbulentnego,
 l_D — szerokość strefy dopalania.



Rys. 7.13. Kinetyczny płomień turbulentny: 1 — strefa niespalonej mieszanki, 2 — strefa spalania, 3 — strefa dopalania

Długość strefy niespalonej mieszanki jest zależna od prędkości przepływu \bar{w} , prędkości rozprzestrzeniania się płomienia w_T i promienia palnika r_0

$$l = k_1 \frac{\bar{w} r_0}{w_T} \quad [7.14]$$

Szerokość płomienia turbulentnego jest proporcjonalna do prędkości przepływu i promienia palnika, gdyż pierwsza z tych wielkości bezpośrednio wpływa na prędkość pulsacji, a druga na skalę turbulencji oraz odwrotnie proporcjonalna do normalnej prędkości spalania

$$\delta_T = k_2 \frac{\bar{w} r_0}{w_n} \quad [7.15]$$

Skrócenie więc kinetycznego płomienia turbulentnego można uzyskać przez zmniejszenie średnicy palnika i prędkości przepływu oraz zwiększenie normalnej prędkości spalania, na przykład na drodze zwiększenia początkowej temperatury mieszanki lub jej składu w taki sposób, aby spalanie zachodziło przy współczynniku nadmiaru powietrza odpowiadającym maksymalnej wartości normalnej prędkości spalania.

Szerokość strefy dopalania zależy wyłącznie od prędkości spalin w tej strefie

$$l_D = k_3 w \quad [7.16]$$

W związku z tym nie ma możliwości oddziaływania na wartość tej wielkości. Sytuację poprawia to, że szerokość strefy dopalania wynosi zaledwie 10—15% całkowitej długości płomienia.

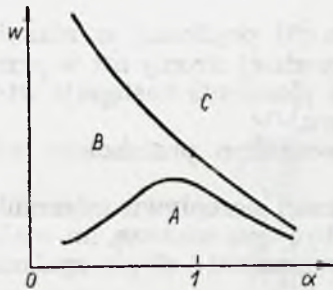
Występujące we wszystkich trzech ostatnich równaniach współczynniki k_1 , k_2 , k_3 określa się doświadczalnie.

Wydajność cieplną palnika ogranicza zdmuchnięcie płomienia, które występuje przy zbyt wielkich prędkościach wypływu mieszanki. Zbyt małe prędkości wypływu powodują natomiast przeskok płomienia do wnętrza palnika.

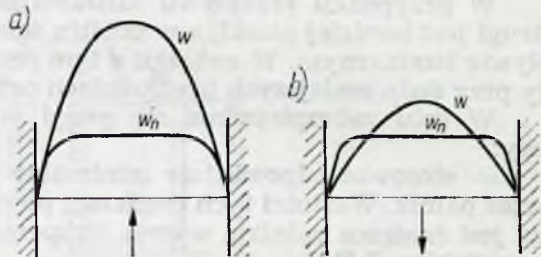
Na rys. 7.14 przedstawiono, jak usytuowana jest strefa statecznej pracy palnika na wykresie $w-\alpha$.

Najbardziej stateczne w szerokim zakresie prędkości przepływu są płomienie dyfuzyjne ($\alpha = 0$) oraz płomienie, w których paliwo było tylko częściowo zmieszane z utleniaczem ($\alpha \ll 1$).

Poczynając od $\alpha = 1$, lub jego wartości nieco mniejszej od 1, zakres statecznej pracy płomienia zacieśnia się: z jednej strony grozi mu przeskok, z drugiej — zdmuchnięcie. Przyczyną przeskoku i zdmuchnięcia jest naruszenie warunku równości prędkości przepływu i normalnej prędkości spalania ($w = w_n$) w warstwie granicznej strugi.



Rys. 7.14. Zakresy pracy turbulentnego płomienia gazowego: A — obszar przeskoku płomienia, B — obszar stateczności płomienia, C — obszar zdmuchnięcia płomienia



Rys. 7.15. Rozkład prędkości przepływu w i normalnej prędkości spalania w_n w palniku: a) przypadek wynoszenia płomienia na skraj palnika, b) przypadek przeskoku do wnętrza palnika

Na rys. 7.15 przedstawiono dwa przypadki: gdy płomień jest wynoszony na skraj palnika i gdy przenosi się do jego wnętrza. W tym drugim przypadku następuje przeskok. Występuje on wtedy, kiedy normalna prędkość spalania w warstwie przysciennej jest w każdym punkcie większa od występującej tam prędkości przepływu.

W warunkach granicznych krzywe w i w_n są do siebie styczne w pobliżu ścianek. Wyraża się to równaniem gradientów

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow r_0} = \left(\frac{dw_n}{dr}\right)_{r \rightarrow r_0} \quad [7.17]$$

gdzie: r — odległość od osi palnika,
 r_0 — promień przewodu palnika.

W przepływie laminarnym rozkład prędkości przepływu jest paraboliczny

$$w = w_{os} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

a średnia prędkość równa połowie prędkości na osi strugi

$$w = \frac{1}{2} w_{os}$$

stąd

$$\frac{dw}{dr} \Big|_{r \rightarrow r_0} = -\frac{2w_{os}}{r_0} = -\frac{4\bar{w}}{r_0}$$

Warunek graniczny przeskoku wyraża więc zależność

$$\left(\frac{dw_n}{dr}\right)_{r \rightarrow r_0} = \frac{4\bar{w}}{r_0} \quad [7.18]$$

Dla danej mieszanki palnej wartość $(dw_n/dr)_{r \rightarrow r_0}$ jest wielkością stałą. Zmiana promienia palnika powinna więc powodować proporcjonalną do niej zmianę granicznej dla przeskoku płomienia średniej prędkości przepływu mieszanki

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{r_{01}}{r_{02}} \quad [7.19]$$

W przypadku przepływu turbulენტnego profil prędkości w rdzeniu strugi jest bardziej płaski, a w pobliżu ścianki bardziej stromy niż w przepływie laminarnym. W związku z tym przeskok płomienia następuje wtedy przy dużo mniejszych prędkościach przepływu.

W celu zabezpieczenia się przed występowaniem przeskoków należy:

— stosować odpowiednie minimalne prędkości przepływu mieszanki przez palnik. Wartości tych prędkości powinny być tym większe, im większa jest średnica palnika, wyższa temperatura mieszanki i ciepło spalania gazu (tablica 7.1),

Tablica 7.1

MINIMALNE, ZE WZGLĘDU NA PRZESKOK PŁOMIENIA, ŚREDNIE PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU MIESZANKI NIEKTÓRYCH PALNYCH GAZÓW TECHNICZNYCH Z POWIETRZEM

Paliwo	Ciepło spalania kJ	Temperatura mieszanki °K	Średnica palnika mm	Chłodzenie palnika	Minimalna prędkość przepływu m/s
Gaz miejski	14700 – 23000	475 625	18	chłodzony	7,0 18,0
Acetylen	58000	290	25	nie chłodzony	2,8
Gaz generatorowy	3500 – 3900	290	180	chłodzony	3,0
Gaz olejowy	43000	525 290 675	37	chłodzony nie chłodzony chłodzony	5,5 7,0 20,0
Mieszanka propanu i butanu	50000	600	37	nie chłodzony	4,0

— wyrównywać rozkład prędkości przed wypływem z palnika przez zastosowanie zewężającej się końcówki,

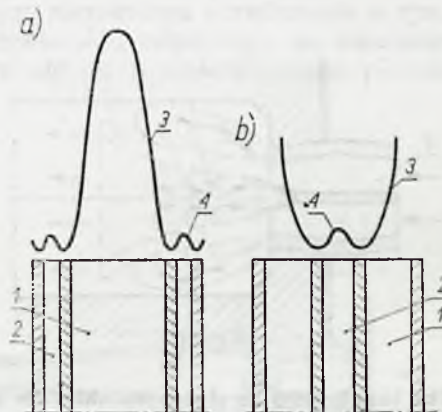
— ewentualnie chłodzić palnik powietrzem lub wodą.

Niebezpieczeństwo przeskoku występuje przy małych natężeniach przepływu mieszanki przez palnik. Przy dużych natężeniach natomiast może nastąpić zdmuchnięcie płomienia. Aby uniknąć warunków, w których grozi zdmuchnięcie można zabezpieczyć się następującymi zabiegami:

— organizować proces spalania w możliwie wysokich temperaturach przez wstępne podgrzanie mieszanki, stosowanie współczynników nadmiaru powietrza bliskich jednościami, zmniejszenie do minimum odprowadzenia ciepła ze strefy spalania,

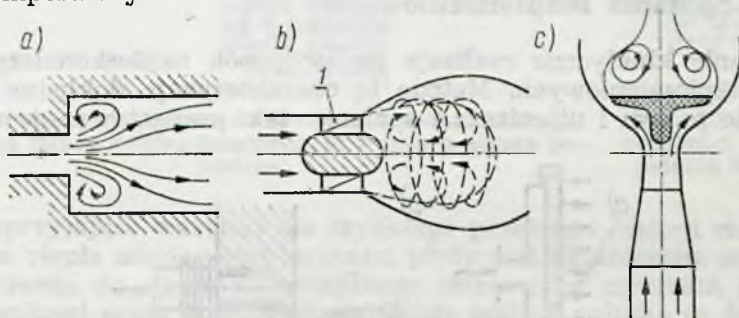
- turbulizować strugę mieszanki,
- dokładnie wstępnie wymieszać paliwo z utleniaczem (doprowadzić do końca dyfuzję molekularną),
- zastosować którąś z metod stabilizacji płomienia.

Na rys. 7.16 pokazano stabilizację spalania za pomocą płomienia pilotującego umieszczonego pierścieniowo na obwodzie palnika lub centralnie.



Rys. 7.16. Ustatecznianie spalania w palnikach gazowych za pomocą płomieni pilotujących: a) pilotującego płomienia pierścieniowego, b) pilotującego płomienia centralnego

Prędkość przepływu w kanale doprowadzającym mieszankę do tego płomienia jest tak dobrana, aby zachodzące tam spalanie było laminarne i stateczne w szerokim zakresie zmienności warunków, w których przebiega spalanie. W ten sposób poprawia się w zasadniczej strudze możliwości zapłonu mieszanki w warstwie granicznej, wskutek podwyższenia w niej temperatury.



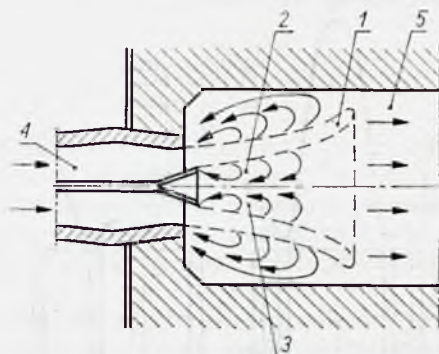
Rys. 7.17. Ustatecznianie płomienia w palniku gazowym za pomocą cyrkulacji gorących spalin: a) wytwarzanie strefy cyrkulacji przez nagłą zmianę pola powierzchni przekroju poprzecznego kanału, b) wytworzenie strefy cyrkulacji przez ruch wirowy, c) wytworzenie strefy cyrkulacji przez wstawienie w strugę ciała nieopływowego, 1 — zawirowywacz

Przy większych natężeniach przepływu mieszanki ten sposób stabilizacji jest niewystarczający i trzeba stosować inne metody oparte przede wszystkim na cyrkulacji gorących spalin.

Trzy tego rodzaju układy zostały przedstawione na rys. 7.17. W pierwszym układzie strefa cyrkulacji powstaje wskutek nagłej zmiany pola

powierzchni przekroju poprzecznego kanału przepływowego. Jeśli przekrój kanału jest kołowy, wtedy powstaje zewnętrzny wir toroidalny gorących spalin, które podtrzymują zapłon.

W drugim i trzecim układzie powstaje wir centralny: w drugim — wskutek ruchu skrętnego strugi, a w trzecim przez wstawienie w strugę ciała nieopływowego (obydwa te sposoby zostały szczegółowo opisane w rozdziale 6).

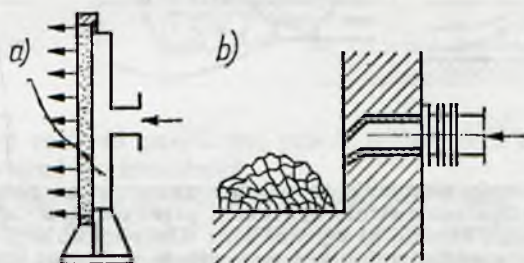


Rys. 7.18. Schemat palnika tunelowego ze złożonym układem stabilizacji: 1 — strefa spalania, 2 — centralna strefa cyrkulacji, 3 — zewnętrzna strefa cyrkulacji, 4 — przewód doprowadzający mieszankę, 5 — kanał odprowadzający spaliny

W rozwiązaniach technicznych często są stosowane złożone układy stabilizacji. Zostało to pokazane na rys. 7.18, który przedstawia schematycznie gazowy palnik tunelowy. Tworzą się tam dwie strefy cyrkulacji spalin stabilizujących płomień: wewnętrzna za ciałem nieopływowym i zewnętrzna wywołana nagłą zmianą przekroju kanału.

7.4. Spalanie bezpłomieniowe

Spalanie kinetyczne realizuje się w sposób najdoskonalszy w palnikach bezpłomieniowych. Metodę tę charakteryzuje dokładne wstępne zmieszanie paliwa i utleniacza i spalanie tak przygotowanej mieszanki



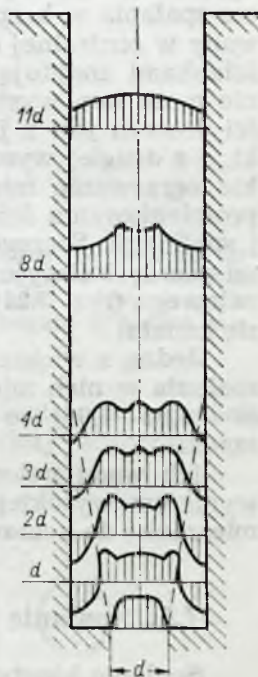
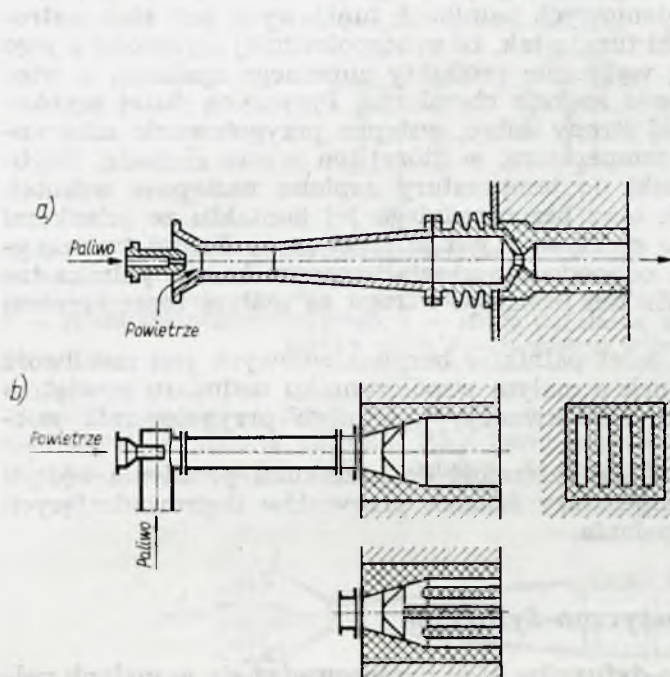
Rys. 7.19. Palniki do spalania bezpłomieniowego: a) palnik z płytą ceramiczną, b) palnik typu uderzeniowego

w odpowiednio ukształtowanych komorach ceramicznych, w temperaturze bardzo bliskiej adiabatycznej temperatury spalania.

Rozgrzane do wysokiej temperatury powierzchnie ceramicznej wykładziny komory zapewniają wysoką stateczność procesu przy dużych na-

teżeniach przepływu mieszanki. Użycie określenia „spalanie bezpłomieniowe” tłumaczy się tym, że przy odpowiednim, wstępnym przygotowaniu mieszanki proces reakcji chemicznej zostaje zakończony w komorze a płomień na tle jej rozżarzonych ceramicznych ścianek jest niewidoczny.

Na rysunkach 7.19 i 7.20 przedstawiono schematycznie najczęściej spotykane rozwiązania konstrukcyjne palników do spalania bezpłomieniowego. Zasadniczym elementem rozwiązania z rys. 7.19a jest prowadząca płytę wykonaną z materiału odpornego na działanie wysokiej temperatury. Płyta ogrzewa się od promieniującego płomienia i w ten sposób



Rys. 7.20. Palniki ejektorowe do spalania bezpłomieniowego: a) z czynną strugą paliwa gazowego, b) z czynną strugą powietrza

Rys. 7.21. Rozkład prędkości w kanale palnika tunelowego

tworzy sprzyjające warunki dla szybkiego przebiegu reakcji chemicznej. Wymiana ciepła między obu stronami płyty jest ograniczona ze względu na przeciwnie do strumienia ciepłego skierowany strumień mieszanki przepływającej przez pory w płycie. Wadą takiego palnika są duże opory przepływu oraz konieczność stosowania dobrze oczyszczonej mieszanki. Z tego powodu znalazły one zastosowanie jedynie w ograniczonym zakresie w małych urządzeniach przemysłowych i laboratoryjnych.

Inne, bardzo proste rozwiązanie konstrukcyjne, w którym realizuje się spalanie bezpłomieniowe zostało pokazane na rys. 7.19b.

Reakcja chemiczna zachodzi tam w stosie tłuczni ceramicznego, który jest zasilany mieszanką wypływającą z odpowiednio ukształtowanej i skierowanej dyszy.

Na rys. 7.20 przedstawiono dwie konstrukcje ejektorowych palników tunelowych, których zaletą, oprócz możliwości stosowania zapyłonej mie-

szanki, małego oporu aeromechanicznego oraz dobrej stabilizacji spalania przy dużym natężeniu przepływu, jest samoregulacja stosunku paliwa do powietrza. Przy użyciu paliwa gazowego pod odpowiednim ciśnieniem otrzymuje się prosty, jednoprzewodowy układ nie wymagający powietrznej instalacji zasilającej.

Jeśli do dyspozycji jest paliwo gazowe o niskim ciśnieniu, wtedy stosuje się palniki ejektorowe dwuprzewodowe, gdzie czynnikiem napędzającym jest sprężone powietrze.

Intensywność spalania bezpłomieniowego jest wielokrotnie większa niż intensywność spalania w żagwi. Początkowo tłumaczono to katalitycznym działaniem wykładziny komory. Później okazało się jednak, że proces spalania w bezpłomieniowych palnikach tunelowych jest skoncentrowany w centralnej części tunelu tak, że w bezpośredniej styczności z jego ściankami znajdują się wyłącznie produkty zupełnego spalania, a więc nie może tam występować reakcja chemiczna. Przyczyną dużej szybkości procesu jest z jednej strony dobre, wstępne przygotowanie mieszanki, a z drugiej wysoka temperatura, w której ten proces zachodzi. Szybkie ogrzewanie mieszanki do temperatury zapłonu następuje wskutek promieniowania ścianek oraz bezpośredniego jej kontaktu ze ściankami i spalinami. Szczególnie efektywny jest kontakt ze spalinami tworzącymi wir cyrkulacyjny w odpowiednio ukształtowanym kanale palnika tunelowego (rys. 7.21). Wir ten powstaje w rogu za małym rozszerzeniem się kanału.

Jedną z większych zalet palników bezpłomieniowych jest możliwość spalania w nich mieszanek o małym współczynniku nadmiaru powietrza ($\alpha = 1,02-1,06$) co jest konsekwencją wstępnego przygotowania mieszanki.

Ich wadą natomiast jest skłonność do przeskoku płomienia będąca wynikiem wysokiej temperatury ścianek przewodów doprowadzających mieszankę do komory spalania.

7.5. Spalanie kinetyczno-dyfuzyjne

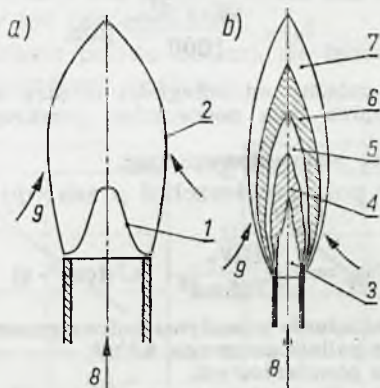
Spalanie kinetyczno-dyfuzyjne gazu przeprowadza się w małych palnikach, najczęściej do użytku domowego, w których paliwo gazowe jest wstępnie zmieszane z powietrzem w stopniu nie wystarczającym do realizacji zupełnego spalania. W związku z tym proces jest rozłożony na dwa etapy. W pierwszym etapie zachodzi niepełne spalanie kinetyczne, w drugim natomiast spalanie dyfuzyjne resztek paliwa z tlenem dopływającym z otoczenia.

Na rys. 7.22 przedstawiono strukturę dwu płomieni kinetyczno-dyfuzyjnych: laminarnego i turbulentnego. W płomieniu laminarnym oba etapy zachodzą zasadniczo w cienkich warstwach: pierwszy na powierzchni stożka wewnętrzznego, a drugi na powierzchni zewnętrznej aureoli.

W płomieniu turbulentnym warstwy spalania rozszerzają się. W pobliżu przekroju wyjściowego palnika powstaje strefa zimnej mieszanki stopniowo przechodzącej w strefę kinetycznego spalania, gdzie w pełni zostaje zużyty tlen zawarty pierwotnie w mieszance. W związku z tym płomień opuszcza mieszanina paliwa i spalin.

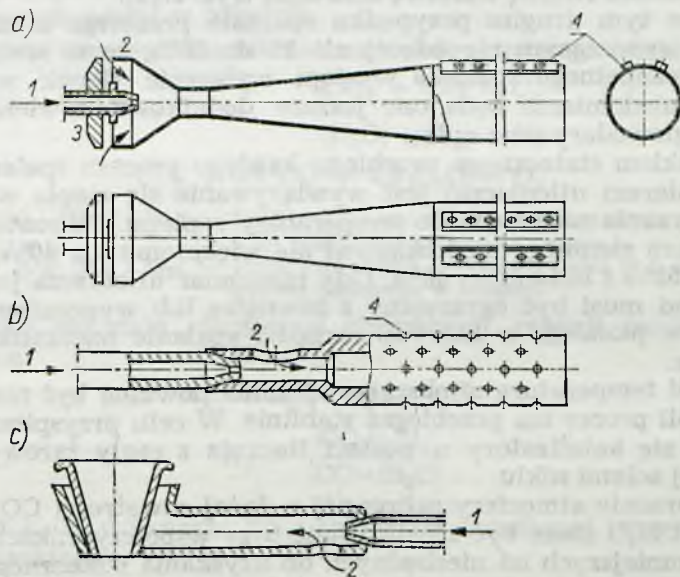
W miarę dopływu do niej tlenu z otoczenia powstaje drogą turbulentnej dyfuzji strefa wtórnego spalania (dyfuzyjnego), a za nią strefa dopalania. Często zaciera się ostro występująca granica między pierwot-

nym i wtórnym spalaniem. Jeśli mieszanka wchodząca do obszaru płomienia kinetycznego jest zbyt bogata w paliwo, wtedy w następstwie niedotlenienia w procesie pierwotnym powstaje duża ilość sadzy i ciężkich węglowodorów. Składniki te ogólnie biorąc nie zdążą związać się z tlenem



Rys. 7.22. Płomienie kinetyczno-dyfuzyjne: a) płomień laminarny, b) płomień turbulentny, 1 — czoło płomienia kinetycznego, 2 — płomień dyfuzyjny, 3 — strefa mieszanki, 4 — strefa spalania kinetycznego, 5 — strefa mieszanki paliwa i spalin, 6 — strefa spalania dyfuzyjnego, 7 — strefa dopalania, 8 — bogata w paliwo mieszanka palna, 9 — powietrze wtórne

w płomieniu dyfuzyjnym, ani nawet w strefie dopalania, co zmniejsza sprawność termiczną palnika. Aby temu zapobiec należy wstępnie wymieszać z paliwem 20—50% powietrza do spalania.



Rys. 7.23. Palniki kinetyczno-dyfuzyjne: a) palnik stosowany w kotłach centralnego ogrzewania, b) palnik zapłonowy, c) palnik stosowany w gospodarstwie domowym, 1 — paliwo gazowe, 2 — powietrze, 3 — regulacja dopływu powietrza, 4 — otwory płomieniowe

Na rys. 7.23 przedstawiono schematycznie trzy palniki kinetyczno-dyfuzyjne. Wszystkie są typu atmosferycznego, to znaczy, że pobierają powietrze wprost z otoczenia. Długość płomienia w takim palniku można wyznaczyć korzystając z następującego wzoru doświadczalnego

$$l_p = \frac{c q_F \sqrt{d^3}}{1000} \text{ mm} \quad [7.20]$$

gdzie: c — współczynnik zależny od odległości między otworami płomieniowymi,
 q_F — obciążenie cieplne pola powierzchni przekroju poprzecznego palnika, $\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$;
 d — średnica otworu płomieniowego, mm.

Obciążenie cieplne pola powierzchni przekroju poprzecznego palnika określa się z zależności

$$q_F = \frac{B W_T}{0,785 n d^2} \text{ kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \quad [7.21]$$

gdzie: B — objętościowe natężenie przepływu paliwa gazowego, m^3/s ,
 W_T — ciepło spalania paliwa gazowego, kJ/m^3 ,
 n — liczba otworów płomieniowych,
 d — średnica otworu płomieniowego, cm.

7.6. Spalanie paliwa gazowego z niedomiarem utleniacza

Spalanie paliwa gazowego z niedomiarem utleniacza znajduje zastosowanie między innymi w procesie „półspalania”. Jest to jedna z metod otrzymywania acetyleny na drodze niezupełnego spalania metanu w czystym tlenie (rys. 1.11). Spalanie takie stosuje się również w piecach kuźniczych do bezzgorzelinowego ogrzewania wsadu, gdzie produkty niezupełnego spalania tworzą warstwę ochronną (rys. 1.13).

Jeśli w tym drugim przypadku spalanie przebiega z niedomiarem powietrza wynoszącym nie więcej niż 20 do 30%, to w spalinach, jako produkt niezupełnego spalania wystąpi wyłącznie tlenek węgla. Przy większym niedomiarze będą one jeszcze dodatkowo zawierały metan, ciężkie węglowodory oraz sadzę.

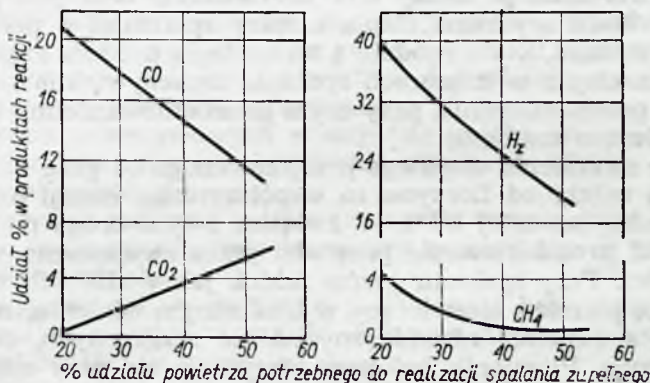
Warunkiem statecznego przebiegu każdego procesu spalania (a więc i z niedomiarem utleniacza) jest wywiązywanie się ciepła wystarczającego do ogrzania mieszanki do temperatury zapłonu. Odpowiada to przy spalaniu gazu ziemnego niedomiarowi nie większemu niż 40%, gazu kokowego — 55% i butanu — 40%. Gdy niedomiar utleniacza jest większy, wtedy układ musi być ogrzewany z zewnątrz lub wyposażony w strefy stabilizujące płomień, w których zachodzi spalanie mieszanki bogatszej w utleniacz.

Na ogół temperatura w obszarze spalania powinna być nie niższa niż 1300°K , jeśli proces ma przebiegać stabilnie. W celu przyspieszenia reakcji stosuje się katalizatory w postaci tłuczni z cegły żarowytrzymałej, przesyconej solami niklu.

Wytworzenie atmosfery ochronnej o dużej zawartości CO i H_2 i mniej — CO_2 i H_2O może być zrealizowane przy współczynnikach nadmiaru powietrza mniejszych od niezbędnych do uzyskania statecznego spalania, a więc wymaga ogrzewania komory lub, co jest częściej stosowane w praktyce, wstępnego ogrzewania składników reakcji. Zależność udziału poszczególnych składników w produktach reakcji od składu mieszanki przedstawiono wykreślnie na rys. 7.24.

Przy spalaniu paliwa gazowego w temperaturze nie niższej niż 1300°K i odpowiednio długim czasie przebywania mieszanki w komorze spalania, można przyjąć, że produkty reakcji znajdują się w stanie równowagi chemicznej. W tym przypadku oraz przy założeniu, że w procesie niezupełnego spalania nie tworzy się sadza, można dla obliczenia składu spalin przyjąć następujący tok postępowania:

1) na podstawie składu paliwa gazowego oblicza się teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do jego zupełnego spalania,



Rys. 7.24. Skład produktów niezupełnego spalania w zależności od składu mieszanki. Temperatura strefy reakcji 1300°K

2) ustala się współczynnik nadmiaru powietrza, przy którym powinno przebiegać spalanie i w ten sposób określa się rzeczywistą ilość tlenu i azotu biorących udział w procesie,

3) zestawia się równania bilansu materiałowego węgla, wodoru i tlenu

$$|CO_2| + |CO| = C_p \quad [a]$$

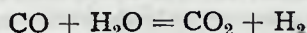
$$|H_2O| + |H_2| = H_p \quad [b]$$

$$|CO_2| + 0,5 |CO| + 0,5 |H_2O| = O_p \quad [c]$$

gdzie: $|CO|$, $|CO_2|$, $|H_2O|$ i $|H_2|$ — ilość otrzymanych produktów spalania w molach na 1 m³ spalonego paliwa gazowego,

$|C_p|$, $|H_p|$ i $|O_p|$ — zawartość węgla, wodoru i tlenu w 1 m³ spalonego paliwa gazowego w molach.

4) określa się stałą równowagi chemicznej reakcji konwersji CO z parą wodną



$$K_p = \frac{|CO_2| \cdot |H_2|}{|CO| \cdot |H_2O|} \quad [d]$$

5) wartość K_p wyznacza się z tablic dla określonej temperatury panującej w reaktorze.

W ten sposób układ czterech równań ([a], [b], [c] i [d]) umożliwia wyznaczenie czterech niewiadomych ilości substancji CO, CO₂, H₂ i H₂O. Znajac także z poprzedniego (pkt 2) ilość N₂, można obliczyć udziały objętościowe wszystkich składników zawartych w spalinach.

W oparciu o skład spalin zestawia się bilans cieplny procesu i w ten sposób określa temperaturę w reaktorze. Gdy różni się ona znacznie od przyjętej do wyznaczenia stałej równowagi chemicznej to obliczenie odpowiednio koryguje się.

7.7. Promieniowanie ciepłe płomienia gazowego

Przestrzeń robocza wielu stosowanych w technice komór spalania wykonuje dwie funkcje. Służy ona jako reaktor oraz jest przestrzenią, w której zachodzi wymiana ciepła między spalinami a materiałem lub jakimiś elementami, które zgodnie z technologią procesu mają być ogrzane. Wymiana ciepła w komorach spalania urzeczywistnia się na drodze konwekcji i promieniowania, przy czym promieniowanie ma w tym przypadku decydujące znaczenie.

Wartość strumienia cieplnego przejmowanego od gazu na drodze promieniowania zależy od iloczynu ze współczynnika emisji oraz temperatury w potęgze czwartej (ϵT^4). W związku z tym droga do zwiększenia intensywności promieniowania prowadzi przez zwiększenie wartości obu tych wielkości. Przy spalaniu gazów takich jak wodór lub tlenek węgla otrzymuje się płomień nieświecący w bladym odcieniu, mało widoczny za dnia, a zupełnie niewidoczny na tle rozgrzanych, ceramicznych ścianek komory. Płomień świecący otrzymuje się przy spalaniu paliw ulegających rozkładowi w wysokich temperaturach, a więc przede wszystkim węglowodorów. Świecenie płomienia jest uwarunkowane występowaniem w nim rozżarzonych cząstek węgla przede wszystkim pod postacią sadzy. Płomień nieświecący jest charakterystyczny przy spalaniu paliw organicznych zawierających więcej niż 50% tlenu, a także przy spalaniu paliw wstępnie zmieszanych z utleniaczem.

Gazy jedno i dwuatomowe są doskonale przezroczyste i w związku z tym nie świecą. Świecą natomiast gazy trójatomowe takie, jak dwutlenek węgla lub para wodna. Ich świecenie jest jednak słabe i aby je zwiększyć należy w płomień wprowadzić cząstki węgla.

Trzeba przy tym zwrócić uwagę, że zdolność płomienia do promieniowania, określana współczynnikiem emisji i jego świecenie nie zawsze są ze sobą związane jednoznacznie. Promieniowanie ciepłe pary wodnej węgla występuje przy długościach fal 1,7 i 2,4 μ , to jest w temperaturze podczerwieni, podczas gdy wzrok rejestruje świecenie w obszarze fal 0,4—0,8 μ . W ten sposób warstwa gazu zawierająca parę wodną i dwutlenek węgla może nie świecić, a przekazywać ciepło przez promieniowanie. Cząstki sadzy natomiast intensywnie świecą choć maksymalnie promieniają przy długościach fal 1,5—3 μ , które są niewidoczne dla oka.

Na wymianę ciepła przez promieniowanie między płomieniem i otoczeniem wpływa w dużym stopniu sposób spalania i kształt płomienia.

Przy spalaniu paliw nie podlegających termicznemu rozkładowi, których płomień jest przezroczysty, największą wartość strumienia promieniowania cieplnego uzyskuje się w palnikach bezpłomieniowych. Przez spalanie paliw węglowodorowych w płomieniu kinetycznym uzyskuje się wysokie temperatury i niskie współczynniki emisji, z płomienia dyfuzyjnego natomiast odwrotnie — otrzymuje się niskie temperatury i wysokie współczynniki emisji. Ogólnie, w większości przypadków płomień kinetyczny charakteryzuje się większą wartością strumienia promieniowania cieplnego.

Na proces wymiany ciepła w komorze, oprócz wymienionych czynników, w znacznym stopniu oddziaływa struktura przepływu. Im komora jest w większym stopniu wypełniona płomieniem oraz im cieńsza jest warstwa mniej ogrzanego gazu cyrkulującego między nim a powierzchniami odbierającymi ciepło, tym proces wymiany jest bardziej intensywny. Wpływ kształtu płomienia jest szczególnie silny w piecach metalurgicznych, gdzie chodzi o wytworzenie płomienia ścielącego się po wsadzie i pokrywającego go.

Wybór optymalnego sposobu spalania paliw rozkładających się termicznie, z uwagi na wymianę ciepła w komorze, powinien być dokonywany indywidualnie w zależności od rodzaju paliwa, warunków w jakich ma przebiegać proces spalania oraz w zależności od wymagań takich jak ogólny współczynnik nadmiaru powietrza, czy udział poszczególnych elementów komory w przejmowaniu ciepła.

W piecach przemysłowych stosuje się często sztuczne zwiększenie zdolności płomienia do promieniowania cieplnego. Można tego dokonać następującymi sposobami:

1) ogrzewając wstępnie paliwo gazowe do temperatury 1300—1550°K i powodując w ten sposób jego termiczny rozkład (np. w regeneratorach pieców martenowskich),

2) dodając do paliwa gazowego paliwo stałe lub ciekłe i w ten sposób wzbogacając płomień w cząstki świecące (sadzę i koks). Najczęściej stosowanymi dodatkami są smoła i mazut,

3) spalając jednocześnie rozkładające się pod wpływem ciepła i nierozkładające się paliwa gazowe.

Najbardziej efektywnym sposobem zwiększenia zdolności płomienia gazowego do promieniowania jest dodawanie do mieszanki ciężkich paliw węglowodorowych, które nie tylko zwiększają współczynnik emisji płomienia, ale także podnoszą jego temperaturę.

7.8. Spalanie w spalinowych silnikach tłokowych z zapłonem iskrowym

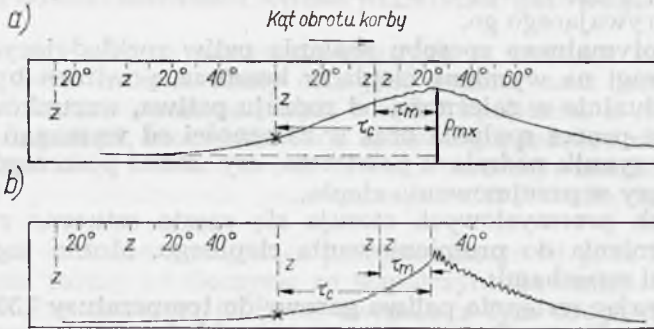
Spalanie w spalinowych silnikach tłokowych z zapłonem iskrowym odbywa się w zamkniętym cylindrze wypełnionym wstępnie przygotowaną mieszanką palną. Mieszankę tę poza jednorodnością (składnikami jej są pary paliwa ciekłego lub paliwo gazowe z powietrzem) cechuje odpowiednio wysoka temperatura i ciśnienie, do których doprowadza się ją sprężając w przybliżeniu adiabatycznie.

Zasadniczo możliwe są w tym przypadku dwa rodzaje spalania: spalanie normalne oraz **spalanie stukowe**, nazywane czasami **detonacją**. Zostały one scharakteryzowane na wykresach zależności ciśnienia panującego w cylindrze od kąta obrotu korby (rys. 7.25).

Podczas spalania normalnego, zaraz po zapłonie, występuje spalanie laminarne, które stopniowo zwiększa swą szybkość i przechodzi w turbulentne. Po pewnym czasie, gdy czoło płomienia zbliża się do ścianek cylindra prędkość rozprzestrzeniania się płomienia ulega stopniowemu zmniejszeniu. Występujące przy tym zmiany ciśnienia są płynne, a jego spadek, po osiągnięciu wartości maksymalnej, jest spowodowany wyłącznie wzrostem objętości wskutek ruchu tłoka i pozbawiony pulsacji.

Podczas spalania nienormalnego ze stukiem, obraz procesu ulega zasadniczej zmianie. Początkowo i to w większej części cylindra, spalanie

niczym nie różni się od poprzednio opisanego. W końcowej jednak fazie (właśnie w pobliżu ścianek) następuje nagły wzrost prędkości spalania, co wywołuje tak samo nagły wzrost ciśnienia (rys. 7.25b) generujący fale uderzeniowe. Fale te przemieszczając się w cylindrze wytrącają swoją energię w kolejnych odbiciach od ścianek, co ujawnia się w stopniowo gasnących pulsacjach zarejestrowanych na wykresie.



Rys. 7.25. Dwa zasadnicze rodzaje spalania w spalinowych silnikach tłokowych o zapłonie iskrowym: a) spalanie normalne, b) spalanie strukowe, Z — zapłon, Z-Z — zwrot zewnętrzny, p_{mx} — ciśnienie maksymalne, τ_c — odcinek czasu od zapłonu do wystąpienia maksymalnego ciśnienia, τ_m — odcinek czasu od ZZ do wystąpienia maksymalnego ciśnienia

Zewnętrzny efekt tych zjawisk jest metaliczny stuk wydobywający się z cylindra, który dał początek nazwie tego rodzaju spalania.

Druga nazwa — spalanie detonacyjne wynika z pewnego podobieństwa między opisanym procesem, a powstawaniem klasycznej detonacji w rurze uderzeniowej.

Przebieg spalania normalnego został dokładniej przedstawiony na rys. 7.26. Po prawej stronie widoczne są kolejne położenia czoła płomienia w cylindrze określone w stopniach kąta obrotu korby, przy czym punktem odniesienia jest zwrot zewnętrzny (ZZ). Na podstawie tego rysunku można było ustalić zmienność trzech wielkości charakteryzujących proces w funkcji kąta obrotu korby: objętości „skonsumowanej” przez spalanie V , prędkości spalania w_s (w stosunku do ścianek cylindra) oraz poziomego rzutu powierzchni czoła płomienia S .

Prędkość spalania ma swoje maksimum w rejonie ZZ wynoszące w tym przypadku 16 m/s. Krzywą zmiany objętości ogarniętej przez spalanie, wyrażonej w procentach całej objętości cylindra, cechuje na początku przyspieszenie jej wzrostu, a na końcu opóźnienie. Prosty odcinek krzywej V nazywa się podstawowym stadium spalania (Q_{II}); poprzedza ją stadium wstępne (Q_I) i zamyka stadium końcowe (Q_{III}).

W stadium wstępnym występuje duża zależność prędkości spalania od składu mieszanki oraz (mniej wyraźna od intensywności turbulencji) prędkości obrotowej wału korbowego.

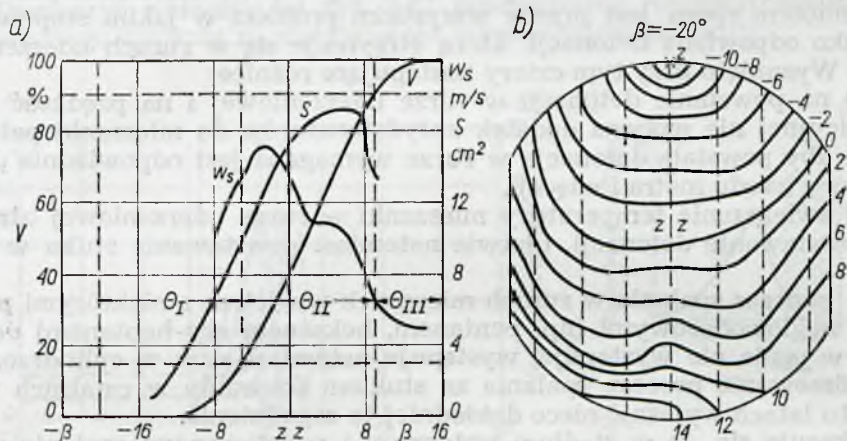
W stadium podstawowym prędkość spalania nie zależy od składu mieszanki, jest natomiast wprost proporcjonalna do prędkości obrotowej.

W stadium końcowym znów ujawnia się wpływ składu mieszanki.

Zgodnie z tym można sądzić, że o przebiegu procesu w stadium wstępnym decydują przede wszystkim fizyko-chemiczne własności mieszanki, które ujawniają się w normalnej prędkości spalania (stąd wpływ jej skła-

du) oraz intensywności turbulencji drobnoskalowej, to jest takiej, której skala jest mniejsza od szerokości płomienia laminarnego.

Turbulencję drobnoskalową można traktować jako pewnego rodzaju formę przejściową z przepływu laminarnego do turbulentnego. Podobnie



Rys. 7.26. Przebieg spalania normalnego w spalinowych silnikach tłokowych o zapłonie iskrowym: a) rozkład charakterystycznych wielkości w funkcji kąta obrotu korby, b) przemieszczanie się czoła płomienia w cylindrze, w_s — prędkość spalania, S — rzut poziomy pola powierzchni czoła spalania, V — krzywa zmiany objętości ogarniętej przez spalanie, θ_I — wstępna faza spalania, θ_{II} — podstawowa faza spalania, θ_{III} — końcowa faza spalania, Z — zapłon, ZZ — zwrot zewnętrzny, β — kąt obrotu korby

formą przejściową od spalania laminarnego do turbulentnego jest spalanie podporządkowane turbulencji drobnoskalowej. Prędkość takiego spalania określa się z zależności

$$w_{TD} \approx w_n \sqrt{1 + \frac{D_T}{D_M}}$$

gdzie: w_n — normalna prędkość spalania,
 D_T — współczynnik dyfuzji turbulentnej,
 D_M — współczynnik dyfuzji molekularnej.

Stadium wstępne kończy się i zaczyna stadium podstawowe, gdy spalanie turbulentne drobnoskalowe przejdzie, w najczęściej spotykane, turbulentne spalanie szerokoskalowe, to jest takie, w którym skala jest większa od szerokości płomienia laminarnego.

W tego rodzaju spalaniu czynnikiem decydującym o jego prędkości są nie właściwości fizyko-chemiczne mieszanki, a przede wszystkim intensywność turbulencji zależna od prędkości obrotowej wału korbowego.

Występowaniu stuku w cylindrze sprzyja zwiększenie początkowego ciśnienia mieszanki. To zjawisko ogranicza stosowanie wysokich stopni sprężania w silnikach z zapłonem iskrowym i przez to uniemożliwia zwiększenie ich sprawności cieplnej.

Stuk zależy od rodzaju paliwa, które z uwagi na odporność na jego występowanie są scharakteryzowane przez liczbę oktanową. Dodatek do paliwa pewnych domieszek — antydetonatorów — znacznie zwiększa liczbę oktanową. Należą do nich przede wszystkim: czteroetyloolów, karbo- nylek żelaza oraz węglowodory aromatyczne np. benzol.

W walce ze stukiem pomyślne rezultaty uzyskuje się przez odpowiednie zabiegi konstrukcyjne, a mianowicie przez zmianę kształtu głowicy, zmianę ilości i położenia świec oraz odpowiednią organizację ruchu wirowego w cylindrze.

Dyskusja na temat istotny stuku toczy się od kilkadziesiąt lat. Przedmiotem sporu jest przede wszystkim problem w jakim stopniu to zjawisko odpowiada detonacji, którą otrzymuje się w rurach uderzeniowych. Wysunięto przy tym cztery następujące różnice:

1) na powstanie detonacji w rurze uderzeniowej i na prędkość fali detonacyjnej nie wpływa dodatek antydetonatorów do mieszanki palnej,

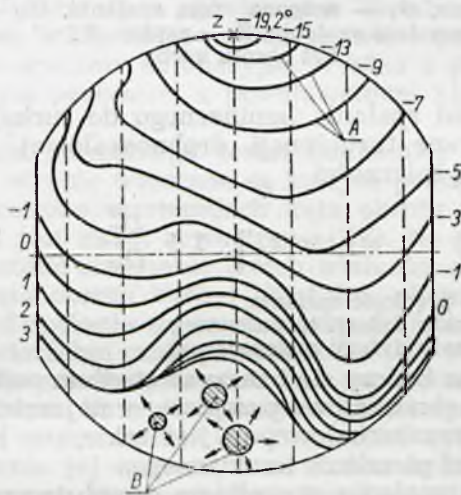
2) aby powstała detonacja w rurze wymagana jest odpowiednia długość rury (rzędu metra i więcej),

3) zwiększenie temperatury mieszanki w rurze uderzeniowej utrudnia powstawanie detonacji, ułatwia natomiast powstawanie stuku w silniku;

4) podczas spalania w rurach mieszanek powietrza z niektórymi paliwami węglowodorowymi (np. pentanem, heksanem czy heptanem) detonacja w ogóle nie występuje, występuje natomiast stuk w cylindrze.

Filmowanie procesu spalania ze stukiem pozwoliło w ostatnich kilkunastu latach wyjaśnić nieco dokładniej to zagadnienie.

Okazuje się, że w stadium wstępnym i podstawowym spalanie stukowe niczym nie różni się od spalania normalnego. Obraz zmienia się dopiero w stadium końcowym. W pewnej chwili w niespalonej części mieszanki (rys. 7.27) powstaje jednocześnie kilka ośrodków zapłonu, od

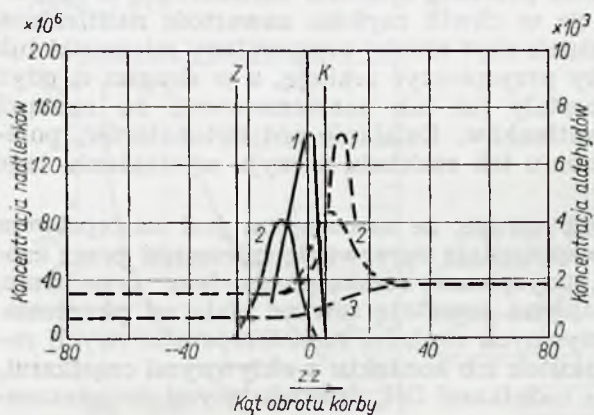


Rys. 7.27. Przebieg spalania stukowego: Z — zapłon, A — kolejne położenia czoła płomienia w funkcji kąta obrotu korby, B — ośrodki samozapłonu

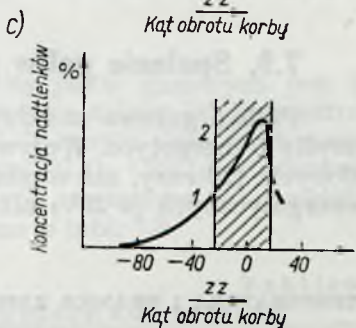
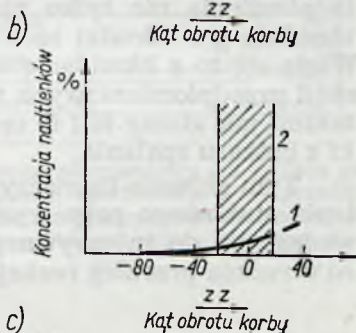
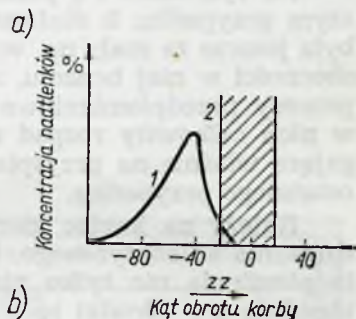
których zaczynają się szybko rozprzestrzeniać sferyczne czoła płomienia. W międzyczasie powstają dalsze ośrodki, które przyspieszają proces i przekształcają go w eksplozję. Jej następstwem jest gwałtowny wzrost ciśnienia tworzący fale uderzeniowe, przemieszczające się w różnych kierunkach w cylindrze.

To szybkie przejście ze spalania normalnego w eksplozyjne tłumaczy się przeobrażeniami chemicznymi, które zachodzą w niespalonej części mieszanki przy końcu spalania w cylindrze (a więc, gdy temperatura

ić ciśnienie niespalonej mieszanki są już znacznie zwiększone. Jak wiadomo w wyniku reakcji wstępnych (przedpłomieniowych) w mieszankach węglowodorowych powstają nadtlenki i aldehydy. Reakcje te mają charakter ekzotermiczny i powodują rozszerzanie się mieszanki, czym można wytłumaczyć widoczne na rys. 7.27 zahamowanie rozprzestrzeniania się normalnego spalania na chwilę przed wystąpieniem eksplozji.



Rys. 7.28. Krzywe zmian koncentracji nadtlenków 1 i aldehydów 2 w spalaniu normalnym (linie przerywane) i stukowym (linie ciągłe): Z — zapłon, K — koniec spalania, 3 — krzywa koncentracji aldehydów w przypadku stosowania benzolu



Rys. 7.29. Położenie strefy spalania (obszar zakreskowany) w stosunku do krzywej rozkładu nadtlenków: a) maksimum koncentracji nadtlenków pokrywa się z obszarem spalania, b) spalanie występuje w początkowym stadium tworzenia się nadtlenków, c) spalanie występuje, gdy zawartość nadtlenków w mieszance uległa zmniejszeniu

W występowaniu zjawiska stuku szczególne znaczenie mają nadtlenki, które przyspieszają przebieg dalszych reakcji wstępnych i przez to skracają okres opóźnienia zapłonu.

Na rys. 7.28 przedstawiono krzywe zmian koncentracji nadtlenków 1 i aldehydów 2 w procesie normalnym (linie przerywane) i stukowym (linie ciągłe).

W przypadku zastosowania benzolu nadtlenki zupełnie nie występują, natomiast zawartość aldehydów 3 jest nieznaczna.

Reakcje przedpłomieniowe w mieszance nie są związane z zapłonem i powstają w wyniku wzrostu jej temperatury pod wpływem sprężania wywołanego ruchem tłoka oraz spalaniem. Można więc wybierając odpowiednią chwilę zapłonu (położenie prostej Z na rys. 7.28) tak zrobić, aby pojawienie się i rozprzestrzenianie płomienia w mieszance następo-

wało w okresie (odcinek między prostymi Z i K), gdy zawartość w niej nadtlenków jest nieznaczna.

Na rys. 7.29 przedstawiono trzy możliwe relacje między obszarem spalania i krzywą rozkładu nadtlenków. Rys. 7.29a odpowiada przypadkowi powstawania stuku, ponieważ zapłon urzeczywistnia się wtedy gdy zawartość nadtlenków w mieszance jest duża.

Na rys. 7.29b i c pokazano przebieg spalania normalnego, w pierwszym przypadku b dlatego, że w chwili zapłonu zawartość nadtlenków była jeszcze za mała np. wskutek zbyt niskiej temperatury mieszanki lub obecności w niej benzolu, aby przyspieszyć reakcję, a w drugim c, gdyż procesy przedpłomieniowe zostały już tak zaawansowane, że nastąpił w nich całkowity rozpad nadtlenków. Działanie antydetonatorów, polegające właśnie na przyspieszeniu ich rozkładu sprzyja wystąpieniu tego ostatniego przypadku.

Należy na koniec zwrócić uwagę, że samozapłon jest następstwem sprężania adiabatycznego. Bezpośrednie ogrzewanie mieszanki przez czoło płomienia nie tylko nie przyspiesza samozapłonu lecz przeciwnie, utrudnia go. Ośrodki samozapłonu powstają zawsze zdala od płomienia. Wiąże się to z likwidacją aktywnych centrów niskotemperaturowych reakcji przedpłomieniowych wskutek ich kontaktu z aktywnymi cząstkami, takimi jak atomy H i O oraz rodnikami OH, dyfundującymi do mieszanki z obszaru spalania.

Tym głównie tłumaczy się zmniejszenie skłonności mieszanki do spalania stukowego przy wystąpieniu w cylindrze silnych zawirowań prowadzących do intensywnego mieszania się spalin ze świeżą mieszanką, co utrudnia przebieg reakcji wstępnych.

7.9. Spalanie paliw gazowych w paleniskach kotłowych

Paliwa gazowe znajdują obecnie coraz szersze zastosowanie w przemyśle i energetyce. Wpływa na to przede wszystkim mniejszy koszt wydobycia (20 razy, niż węgla kamiennego), mniejszy koszt budowy siłowni energetycznych (o 20% niż siłowni na pył węglowy), większa wydajność

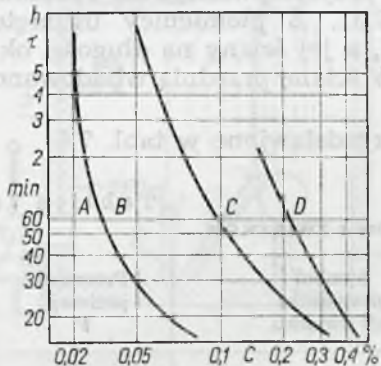
Tablica 7.2

TEMPERATURA I GRANICE ZAPŁONU MIESZANEK PALIW GAZOWYCH Z POWIETRZEM

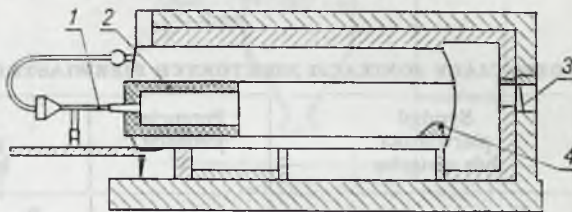
Paliwo	Temperatura samozapłonu °K	Granice zapłonu	
		dolna	górna
Acetylen	608	2,3	82,0
Butan	763	1,5	8,5
Butylen	718	1,7	9,0
Wodór	783	4,1	75,0
Metan	918	5,3	15,0
Tlenek węgla	883	12,5	75,0
Propylen	828	2,2	9,7
Propan	783	2,1	9,5
Siarkowodór	563	4,3	45,5
Etan	803	3,0	14,0
Etylen	813	3,0	16,0
Gaz koksowy	913	5,6	30,8

pieców przemysłowych (o 10% — wielkich pieców i o 30% — pieców martenowskich) oraz na ogół większa sprawność cieplna palenisk.

Trudności eksploatacyjne przy stosowaniu paliw gazowych są związane z ich skłonnością do wybuchów oraz w pewnych przypadkach w toksycznym oddziaływaniu na żywe organizmy. Paliwa gazowe są tym niebezpieczniejsze, ze względu na tworzenie się wybuchowych mieszanek z powietrzem, im niższe są ich temperatury i dolne granice zapłonu (tabl. 7.2).



Rys. 7.30. Wpływ koncentracji C (udziału objętościowego) i czasu działania τ tlenku węgla na organizm człowieka: A — bez znacznego wpływu, B — słabe zatrucie, C — silne zatrucie, D — zatrucie śmiertelne



Rys. 7.31. Kocioł płomieniowy na paliwo gazowe: 1 — palnik ejetorowy, 2 — przednia część płomienicy wyłożona materiałem ognioodpornym, 3 — kłapy bezpieczeństwa, 4 — próg

Najczęściej spotykaną trującą domieszką paliw gazowych jest tlenek węgla. Jego wpływ na organizm człowieka zależy od koncentracji w powietrzu oraz czasu działania (rys. 7.30). Z innych domieszek niebezpiecznymi są: dwutlenek siarki, tlenki azotu (N_2O_5 i NO_2), siarkowodór i amoniak. Dopuszczalne koncentracje tych związków w powietrzu (a także innych, rzadziej spotykanych) podano w tabl. 7.3.

Tablica 7.3

DOPUSZCZALNE, ZE WZGLĘDU NA BEZPIECZEŃSTWO PRACY, KONCENTRACJE NIEKOTRYCH ZWIĄZKÓW CHEMICZNYCH W POWIETRZU

Związek chemiczny	Koncentracja g/m^3	Związek chemiczny	Koncentracja g/m^3
Amoniak	0,02	Siarkowodór	0,01
Benzol	0,05	Spiřytus metylowy	0,05
Tlenek węgla	0,03	Cyjanowodór	0,0003
Dwutlenek siarki	0,02		

Aby uchronić się podczas eksploatacji przed niebezpieczeństwami wynikającymi ze stosowania paliw gazowych należy przede wszystkim dbać o szczelność przewodów i urządzeń zasilających oraz ściśle przestrzegać przepisów mających na celu zabezpieczenie palników przed przeskokiem płomienia oraz przed jego zdmuchnięciem.

Przy zasilaniu paliwem gazowym palenisk kotłów parowych stosuje się przeważnie palniki z wymuszonym doprowadzaniem powietrza. Palniki ejektorowe używa się w przypadku kotłów o małej wydajności (do 25 t/h pary) i to tylko wtedy, gdy powietrze nie jest wstępnie podgrzewane, ze względu na duże opory przepływu przez podgrzewacz, do pokonania których nie wystarczy na ogół energia mechaniczna paliwa gazowego, wykorzystywana w ejektorze do zasiania i przyspieszenia powietrza.

Przykład małego kotła płomienicowego przystosowanego do opalania paliwem gazowym przedstawiono na rys. 7.31. Z płomienicy usunięto ruszt, na którym spalano poprzednio węgiel, a jej ściany na długości ok. 3 m wyłożono materiałem ognioodpornym. W ścianę przednią wbudowano palnik ejektorowy.

Wskaźniki kotłów podobnego typu są przedstawione w tabl. 7.4.

Tablica 7.4

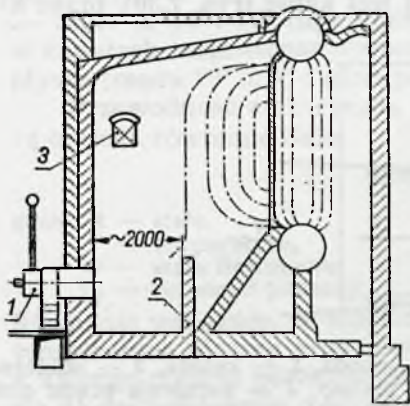
POTENCJAŁY JONIZACJI NIEKTÓRYCH PIERWIĄSKÓW I ZWIĄZKÓW

Symbol pierwiastka lub związku	Potencjał jonizacji, V	Symbol pierwiastka lub związku	Potencjał jonizacji, V
H ₂	15,42	P	10,48
N ₂	15,58	K	4,34
O ₂	12,20	Cs	3,89
He	24,58	Fe	7,87
Li	5,39	CO ₂	13,8
C	11,26	Cl ₂	11,3
Ne	21,56	HCl	12,6
Na	5,14	H ₂ O	12,6

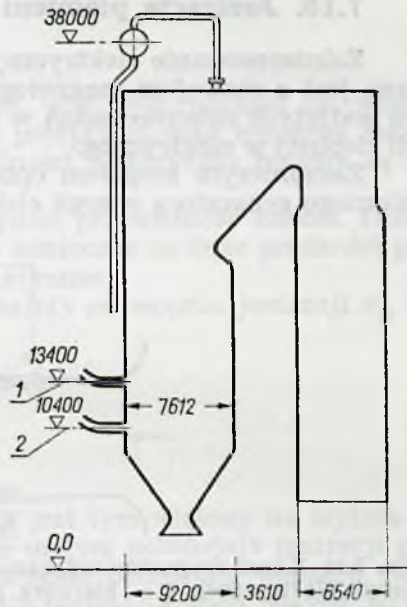
Inny rodzaj kotła opalanego paliwem gazowym pokazano na rys. 7.32. W palenisku naprzeciw palnika, z wymuszonym doprowadzaniem powietrza, wybudowano ażurową ścianę z cegły szamotowej, której zadaniem jest skrócenie płomienia, poprawienie jego stabilizacji przy dużych natężeniach przepływu mieszanki oraz zabezpieczenie ekranów przed działaniem wysokiej temperatury. W obmurzu kotła zainstalowano klapy bezpieczeństwa, które w przypadku wybuchu uchylają się i wyrównują ciśnienie wewnątrz paleniska z otoczeniem.

Na rys. 7.33 przedstawiono kocioł parowy przeznaczony do pracy w elektrociepłowniach. Został on wyposażony w 12 palników na pył węglowy lub paliwo gazowe (rys. 7.34), rozmieszczonych następująco: w ścianie przedniej 10 palników (6 w pierwszym rzędzie i 4 w drugim), w ścianach bocznych, na wysokości pierwszego rzędu, 2 palniki.

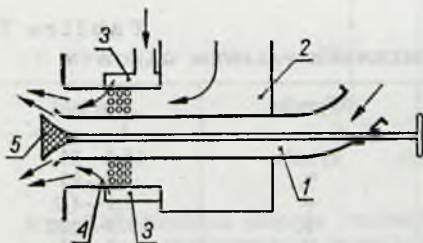
Wyniki pomiarów kotła przy pracy na paliwie gazowym przedstawiono na rys. 7.35. Podczas prób wydajność pary zmieniała się od 261 do 438 t/h, a współczynnik nadmiaru powietrza odpowiednio 1,04—1,46. Udział powietrza pierwotnego w powietrzu dostarczonym do kotła wynosił 20%, prędkości powietrza wtórnego — 20—30 m/s, prędkość paliwa gazowego w otworach łączących kolektor gazu z przewodem powietrza wtórnego (rys. 7.34) — 60—95 m/s. Sprawność cieplna kotła dochodziła do 95%.



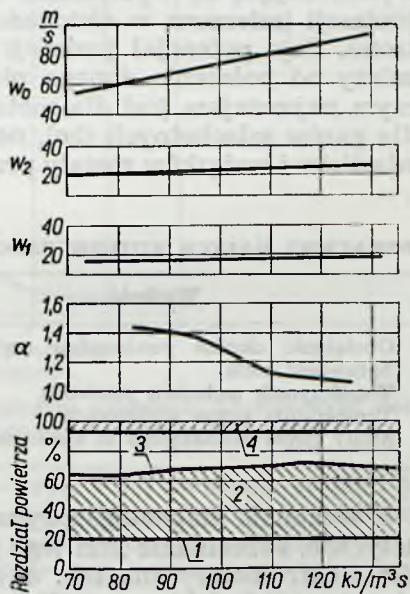
Rys. 7.32. Kocioł wodnorurkowy na paliwo gazowe: 1 — palnik z wymuszonym przepływem powietrza, 2 — ściana z cegły szamotowej, 3 — kłapy bezpieczeństwa



Rys. 7.33. Kocioł parowy o dużej wydajności, opalany pyłem węglowym, albo gazem ziemnym: 1 — pierwszy rząd palników, 2 — drugi rząd palników



Rys. 7.34. Palnik na pył węglowy i paliwo gazowe: 1 — przewód mieszanki pyłu węglowego i powietrza pierwotnego, 2 — przewód powietrza wtórnego, 3 — kolektor paliwa gazowego, 4 — otwory doprowadzające paliwo gazowe z kolektora, 5 — zawór odcinający przepływ mieszanki pyłu węglowego i powietrza

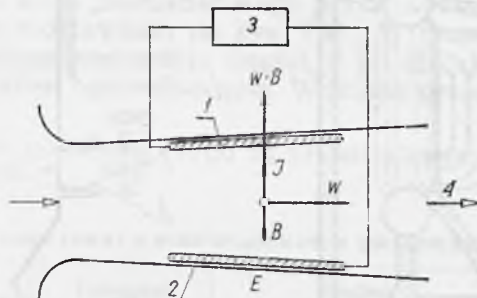


Rys. 7.35. Wyniki pomiarów kotła z rys. 7.33

7.10. Jonizacja płomieni i spalin

Zainteresowanie elektrycznymi własnościami płomienia i spalin związane jest z rozwojem magnetogazodynamiki, przede wszystkim w wyniku podjętych ostatnio badań w dziedzinie bezpośredniej przemiany energii cieplnej w elektryczną.

Zasadniczym zespołem opisanego w rozdziale 1. magnetogazodynamicznego generatora energii elektrycznej jest kanał (rys. 7.36), przez któ-



Rys. 7.36. Kanał magnetogazodynamiczny: 1 — anoda, 2 — katoda, 3 — odbiornik energii elektrycznej, 4 — kierunek przepływu plazmy, J — natężenie prądu elektrycznego, B — indukcja magnetyczna, E — napięcie pola magnetycznego, w — prędkość przepływu plazmy przez kanał

ry przepływa wytworzona w komorze spalania struga plazmy. Plazma stanowi gaz zjonizowany, czyli mieszaninę dodatnich jonów, swobodnych elektronów i niezjonizowanych atomów. Czynnikiem jonizującym spaliny są ruchy cieplne cząstek, które muszą być na tyle intensywne, aby przy zderzeniach związane w nich elektrony mogły otrzymać energię wystarczającą do wyzwolenia się z orbit. Energia ta nazywana energią jonizacji (mierzona w elektronowoltach), podzielona przez ładunek elektronu, daje potencjał jonizacji w voltach. Wartość potencjału jonizacji zależy od położenia danego pierwiastka, w układzie okresowym, przy czym najmniejsza jest dla metali alkalicznych (sód, potas), a największa dla gazów szlachetnych (hel, neon). Potencjały jonizacji niektórych pierwiastków i związków zostały przedstawione w tabl. 7.4 i 7.5.

Tablica 7.5

WSKAZNIKI MAŁYCH KOTŁÓW PAROWYCH ZASILANYCH PALIWEM GAZOWYM

Wielkość	Wymiar	Wartość
Obciążenie cieplne powierzchni ogrzewalnej	$\text{kJ/m}^2\text{s}$	16,5 — 21,1
Sprawność kotła	%	78 — 81
Współczynnik nadmiaru powietrza	—	1,1 — 1,2
Temperatura gazów wylotowych	$^{\circ}\text{K}$	575 — 625
Straty ciepła uchodzącego ze spalinami	%	12 — 13

W kanale magnetogazodynamicznym jest przyłożone silne pole magnetyczne. Przecinanie linii tego pola przez strugę plazmy indukuje w niej siłę elektromotoryczną tak, że w przypadku zamknięcia obwodu popłynie nim prąd elektryczny. Natężenie tego prądu J określa zależność

$$J = \sigma(E + wB)$$

gdzie: σ — przewodność elektryczna plazmy,
 E — napięcie pola magnetycznego,
 B — indukcja magnetyczna,
 w — prędkość strugi plazmy.

Natężenie prądu elektrycznego jest więc tym większe im większa jest przewodność plazmy, jej prędkość przepływu oraz indukcja magnetyczna. Rzeczywiście osiągane przewodności elektryczne plazmy są rzędu $10^7 \div 100 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Jest to $10^7 \div 10^6$ razy mniej niż wynosi przewodność miedzi. Dlatego w kanałach magnetogazodynamicznych konieczne są duże prędkości przepływu (rzędu 10^3 m/s) i silne pola magnetyczne.

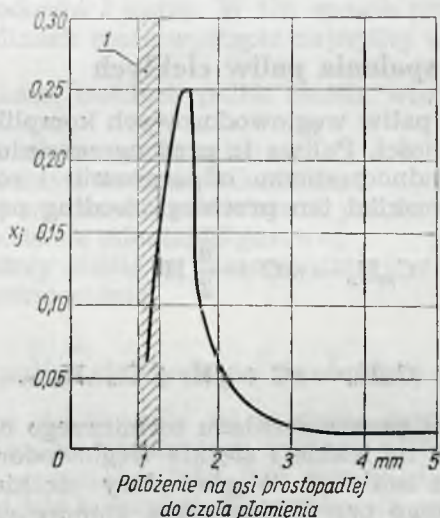
Przewodność elektryczna plazmy zależy od stopnia jonizacji x_j , którą określa równanie Saha

$$x_j = A e^{-\frac{V_j}{kT}}$$

gdzie: A — stała,
 T — temperatura,
 k — stała Boltzmana,
 V_j — potencjał jonizacji.

Równanie wskazuje, że stopień jonizacji jest tym większy im wyższa jest temperatura plazmy przy równocześnie małym potencjale jonizacji gazu, z którego plazma powstała. W celu obniżenia potencjału jonizacji dodaje się do gazu składniki o niskim potencjale jonizacji takich jak cez, sód lub potas.

Oprócz jonizacji termicznej w samym płomieniu (szczególnie węglowodorowym) występuje dodatkowo jonizacja chemiczna, która znacznie



Rys. 7.37. Rozkład stopnia jonizacji w laminarnym płomieniu kinetycznym stechiometrycznej mieszanki tlenu i propanu: 1 — strefa świecenia

(choć tylko na niewielkiej szerokości — rys. 7.37) zwiększa stopień jonizacji. Źródłem jonizacji chemicznej są specyficzne reakcje przebiegające (dla paliw węglowodorowych) według następującego schematu

