

1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

W rozdziale tym podjęta została próba unifikacji problemów związanych z przebiegiem procesów spalania zachodzących w różnych urządzeniach technicznych. Dokonano tego w oparciu o pewną liczbę przykładów takich urządzeń. Przykłady te zostały zaczerpnięte z rozmaitych, nawet odległych od siebie dziedzin techniki, aby tym bardziej uwydatnić podobieństwo elementarnych zjawisk spalania niezależnie od tego, gdzie one zachodzą i na tym tle podać ich klasyfikację. Należy przy tym zwrócić uwagę na to, że podstawą tej klasyfikacji powinno być zjawisko, a nie rodzaj urządzenia, w którym ono przebiega.

Wiąże się to także z potrzebą wprowadzania jednolitej terminologii, co jest sprawą zawsze trudną i odpowiedzialną. Należało się jednak tego podjąć, gdyż konsekwentne przestrzeganie zasady jednomianowości terminów, to jest, aby tylko jedna nazwa oznaczała określone pojęcie, staje się w tym przypadku oczywistą koniecznością.

1.1. Opis typowych urządzeń, w których zachodzą procesy spalania

Szesnaście zebranych niżej przykładów urządzeń, w których zachodzi proces spalania zostało tak dobrane, aby na ich podstawie można było wytypować najważniejsze zagadnienia teorii spalania nadając im przy tym cechy konkretności. Urządzenia te starano się uszeregować według stopnia złożoności zachodzących w nich procesów.

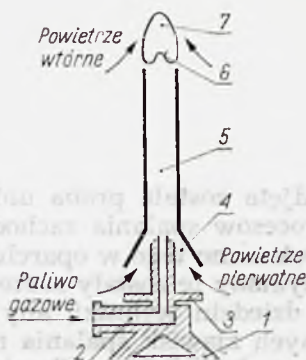
1.1.1. Palnik gazowy Técluba

Palnik Técluba (rys. 1.1) jest udoskonaleniem powszechnie w technice laboratoryjnej stosowanego palnika Bunsena. Udoskonalenie to polega na zastosowaniu lepiej ukształtowanego ejektora, dzięki któremu otrzymuje się korzystniejsze warunki mieszania powietrza pierwotnego z paliwem gazowym.

Palnik składa się z podstawy oraz osadzonego na niej przewodu mieszalnika. U spodu mieszalnika znajduje się ejektor. Przepływ gazu palnego tworzy w nim aktywną strugę, która zasysa z otoczenia powietrze atmosferyczne (zwane powietrzem pierwotnym). Natężenie przepływu powietrza, a tym samym jego współczynnik nadmiaru, jest regulowane położeniem płytki osadzonej na naśrubku dyszy ejektora.

W mieszalniku następuje ujednorodnienie mieszanki. Po jej zapaleniu u wylotu mieszalnika powstaje płomień w kształcie zbliżonym do dwu stożków: wewnętrznego i zewnętrznego.

Stożek wewnętrzny, o barwie przeważnie szaro-niebiesko-zielonkawej, kształtuje warstwę, w której zachodzi właściwy proces spalania. Stożek zewnętrzny, o barwie pomarańczowej stanowi powierzchnię ogr-

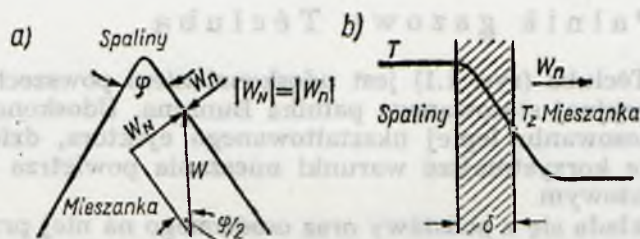


Rys. 1.1. Palnik gazowy Téaluba: 1 — podstawa, 2 — przewód doprowadzający paliwo gazowe, 3 — płytkę (nakrętka) regulującą przepływ powietrza pierwotnego, 4 — ejektor, 5 — mieszalnik, 6 — stożek spalania właściwego, 7 — dopalanie

niczącą przestrzeń dopalania, przy czym źródłem świecenia są dopalające się rozżarzone cząstki sadzy. W dopalaniu bierze udział dyfundujące z otoczenia powietrze wtórne. Płomień obejmuje całą strefę reakcji; warstwę właściwego spalania oraz przestrzeń dopalania. Powierzchnię styku świeżej mieszanki z płomieniem nazywa się czołem płomienia.

Struktura płomienia zależy przede wszystkim od charakteru przepływu to jest od tego, czy przepływ jest laminarny czy też turbulentny. W przepływie laminarnym szerokość warstwy właściwego spalania jest rzędu ułamka milimetra. W przepływie turbulentnym szerokość ta znacznie rośnie na co wpływa głównie wartość intensywności turbulencji. W miarę jej wzrostu czoło płomienia staje się coraz bardziej pofałdowane, aż wreszcie traci swoją jednolitość na rzecz niezależnych, indywidualnie spalających się obszarów o różnym kształcie i objętości.

Wartość kąta wierzchołkowego w stożku spalania zależy od relacji między prędkością spalania, czyli prędkością przemieszczania się czoła



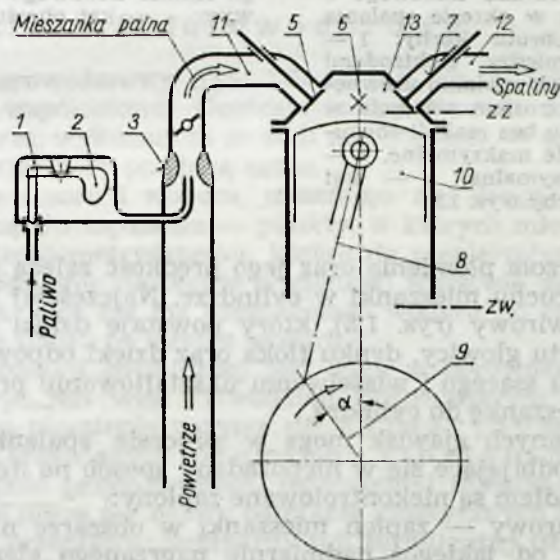
Rys. 1.2. Spalanie mieszanki jednorodnej w palniku gazowym: a — stożek spalania właściwego, b — czoło płomienia, w_n — prędkość spalania, φ — kąt wierzchołkowy stożka spalania, w — prędkość przepływu, w_N — składowa normalna (do czoła płomienia) prędkość przepływu, T — profil temperatury, T_z — temperatura zapłonu, δ — szerokość strefy reakcji

plamienia i prędkością przepływu mieszanki. Relację tę określa trójkąt prędkości przedstawiony na rys. 1.2a, z którego wynika, że równowaga między prędkością przepływu w i prędkością spalania w_n ustala się przy takiej konfiguracji stożka (takim kącie wierzchołkowym φ), dla której spełniona jest równość bezwzględnych wartości: prędkości spalania w_n i składowej normalnej prędkości przepływu mieszanki w_N .

Niezależnie od charakteru przepływu opisany typ spalania cechuje mechanizm przemieszczania się czoła płomienia oparty przede wszystkim na przewodzeniu ciepła, które tą drogą jest transportowane ze strony spalin (rys. 1.2b) do mieszanki. Między mieszanką i spalinami znajduje się strefa reakcji o szerokości δ sprowadzana na ogół, w celu uproszczenia fizycznej analizy procesu, do szerokości warstwy właściwego spalania. Mieszanka przyległa do tej strefy wchodzi w reakcję, gdy jej temperatura przekroczy temperaturę zapłonu T_z . Prędkość spalania jest więc kontrolowana przez prędkość przemieszczania się poziomu temperatury odpowiadającego temperaturze zapłonu.

1.1.2. Spalinowy silnik tłokowy z zapłonem iskrowym

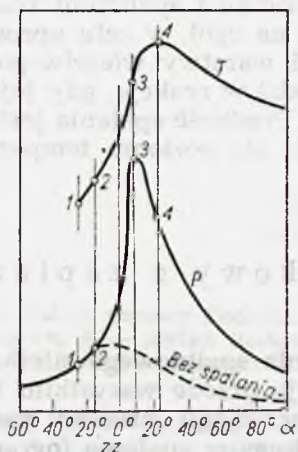
Na rys. 1.3 przedstawiono zasadę działania spalinowego silnika tłokowego z zapłonem iskrowym. Szkic pokazuje przede wszystkim te zespoły, które są przeznaczone do kontroli przebiegu procesu spalania a więc: gaźnik typu ssącego, przewód ssący, komorę spalania (ograniczoną denkiem tłoka oraz ściankami głowicy i cylindra), przewód wydechowy i świecę zapłonową.



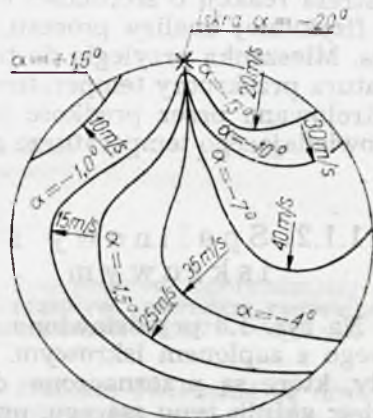
Rys. 1.3. Schemat spalinowego silnika tłokowego o zapłonie iskrowym: 1 — gaźnik, 2 — pływak, 3 — dysza paliwa, 4 — przepustnica, 5 — zawór ssący, 6 — świeca, 7 — zawór wydechowy, 8 — korbowód, 9 — wał korbowy, 10 — tłok, 11 — przewód ssący, 12 — przewód wydechowy, 13 — komora spalania, ZZ — zwrót zewnętrzny, ZW — zwrót wewnętrzny α — kąt obrotu korby

Napływ świeżej, wytworzonej w gaźniku mieszanki do cylindra oraz odpływ spalin, są sterowane przez otwarcia i zamknięcia odpowiednich zaworów.

Zapłon mieszanki w cylindrze następuje od iskry elektrycznej przeskakującej między elektrodami świecy. Wtedy powstaje czoło płomienia, które przemieszcza się ze zmienną prędkością, w zmiennych warunkach, określonych zmianą objętości (sterowaną ruchem tłoka) oraz zmianą ciśnienia i średniej temperatury czynnika roboczego (rys. 1.4).



Rys. 1.4. Przebieg ciśnienia p i temperatury T czynnika roboczego w cylindrze spalinyowego silnika tłokowego o zapłonie iskrowym w okresie spalania w funkcji kąta obrotu korby: 1 — przeskok iskry między elektrodami świecy, 2 — początek spalania uzewnętrzniającego się wzrostem ciśnienia w stosunku do procesu bez reakcji chemicznej, 3 — ciśnienie maksymalne, 4 — temperatura maksymalna, α — kąt obrotu korby (rys. 1.2)



Rys. 1.5. Przemieszczanie się czoła płomienia w komorze spalania spalinyowego silnika tłokowego o zapłonie iskrowym: α — kąt obrotu korby (rys. 1.2)

Geometria czoła płomienia oraz jego prędkość zależą w dużym stopniu od rodzaju ruchu mieszanki w cylindrze. Najczęściej występuje turbulentny ruch wirowy (rys. 1.5), który powstaje dzięki nadaniu odpowiedniego kształtu głowicy, denku tłoka oraz dzięki odpowiedniemu usytuowaniu zaworu ssącego i właściwemu ukształtowaniu przewodu doprowadzającego mieszankę do cylindra.

Oprócz opisanych zjawisk mogą w procesie spalania występować uboczne efekty odbijające się w niepożądany sposób na działaniu silnika. Ich głównym źródłem są niekontrolowane zapłony:

1) zapłon żarowy — zapłon mieszanki w obszarze nie objętym jeszcze spalaniem od jakiegoś nadmiernie nagrzanego elementu komory spalania (np. zaworu wydechowego);

2) samozapłon — zapłon samoczynny wskutek nadmiernego wzrostu temperatury mieszanki spowodowanego zbyt wysokim sprężeniem. Chodzi w tym przypadku o sprężanie wywołane tak ruchem tłoka (przy ewentualnym udziale sprężarki doładowującej), jak i sprężanie będące następ-

stwem reakcji spalania występującej jednocześnie w pewnej części mieszanki;

3) zapłon spowodowany działaniem fali uderzeniowej. Falę taką generuje czoło płomienia znajdujące się w ruchu przyspieszonym. Jeśli spręż w fali jest dostatecznie wysoki to fala ta stanie się nośnikiem zapłonu dla sprężonej w niej mieszanki. W ten sposób powstaje czoło płomienia postępujące w ślad za falą. Taki układ: fala ciśnienia i bezpośrednio związane z nią czoło płomienia nazywa się falą detonacyjną, a cały proces — spalaniem detonacyjnym lub wprost detonacją. Najbardziej charakterystyczną cechą detonacji jest nadźwiękowa (w stosunku do prędkości dźwięku w mieszance) prędkość spalania.

Opisane wyżej zjawiska występują często wspólnie i w rezultacie objawiają się niedopuszczalnym, ze względu na trwałość silnika, przyrostem ciśnienia przypadającym na jeden stopień obrotu korby. Innymi niepożądanymi skutkami są: niska sprawność spalania, grzanie się silnika (a tym samym wzrost strat cieplnych na chłodzenie) oraz, będący wynikiem tych dwu efektów, spadek mocy.

Złożoność zjawisk występujących w procesie spalania, zachodzącym w silnikach tłokowych oraz trudności w badaniu (ze względu na zmienność parametrów w czasie i kłopoty z wizualizacją) sprawiają, że do dziś nie ma w wielu szczegółach jasności co do ich przebiegu, a tym samym możliwości pełnej kontroli pracy silników. Stąd też bierze się konieczność indywidualnego doskonalenia poszczególnych konstrukcji przez próby i kolejną modyfikację. To także stało się źródłem poglądu o małej użyteczności praktycznej przeprowadzania badań podstawowych w konkretnych zastosowaniach przy realizacji nowych projektów silników.

1.1.3. Palnik fluorowodorowy

Palnik fluorowodorowy (rys. 1.6) składa się z trzech przewodów usytuowanych współosiowo. Centralnym przewodem niklowym płynie fluor, środkowym, wykonanym ze stali nierdzewnej — wodór. Całość jest izolowana od atmosfery powłoką azotu.

Strumienie fluoru i wodoru, mieszając się drogą dyfuzji, tworzą mieszkankę palną. Po zapaleniu — punkty, w których mieszanka odpowiada składowi stechiometrycznemu, kształtują powierzchnię czoła płomienia (rys. 1.7). Spalanie następuje w cienkiej warstwie między składnikami reakcji. Tak więc nie ma niespalonego wodoru po stronie fluoru ani też nieużytego fluoru po stronie wodoru.

Szybkość reakcji chemicznej jest duża w porównaniu z szybkością dyfuzji. Dyfuzja jest więc zjawiskiem kontrolującym proces spalania. Dlatego ten typ płomienia nazywa się dyfuzyjnym, w odróżnieniu od poprzednio omawianych płomieni kinetycznych powstających we wstępnie przygotowanej, jednorodnej mieszance palnej. Odpowiednie palniki noszą też nazwę palników kinetycznych lub dyfuzyjnych.

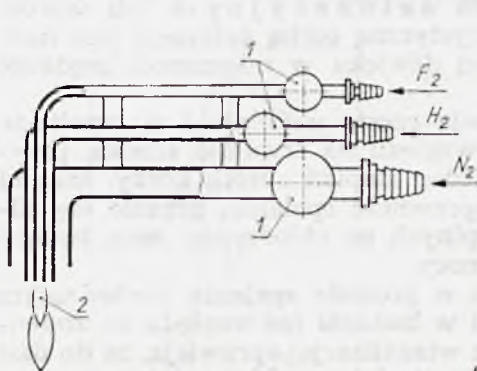
Charakter przepływu: laminarny lub turbulentny decyduje o mechanizmie dyfuzji, która w przepływie laminarnym jest typu molekularnego, w turbulentnym natomiast — wirowego. Ma to istotny wpływ na jej szybkość, a tym samym, na kształt i charakterystyki płomienia.

Maksymalna temperatura reakcji (rzędu 4300°K) występuje w punkcie, w którym następuje zapłon, nieco poniżej widocznego w nim, silnie świeżącego rdzenia.

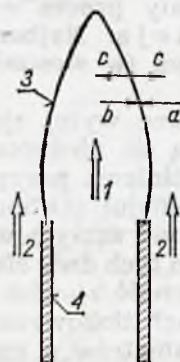


Konkretna wartość temperatury dla określonych fizyko-chemicznych właściwości składników reakcji zależy przede wszystkim od ich stosunku prędkości.

Istota regulacji płomienia dyfuzyjnego polega więc na poszukiwaniu optymalnego stosunku prędkości strumieni (w tym konkretnym przypadku): fluoru i wodoru. Przy zbyt dużej prędkości wodoru (zewnętrznego) w stosunku do strumienia fluoru (wewnętrznego) jasno świecący rdzeń



Rys. 1.6. Palnik fluorowodorowy: 1 — zawory regulacyjne, 2 — płomień

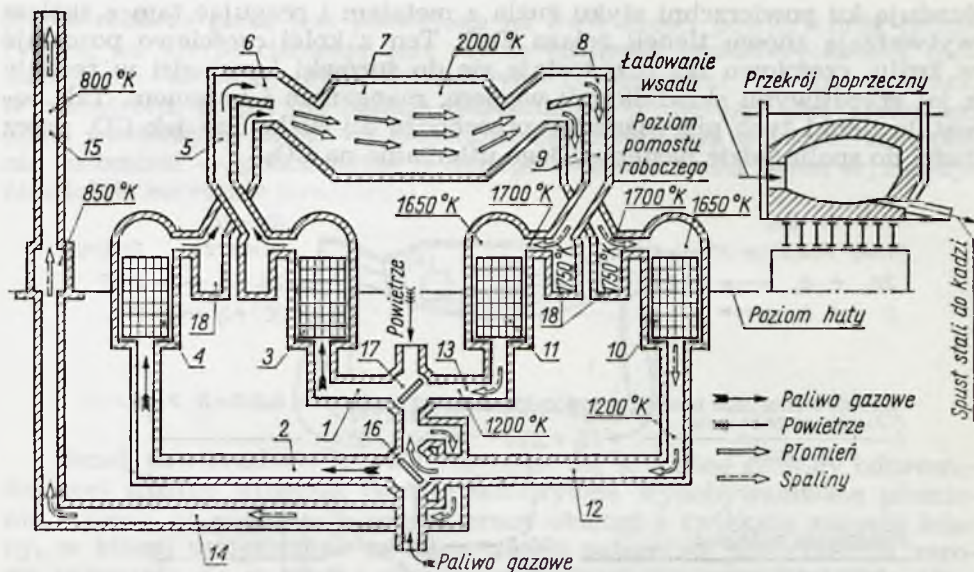


Rys. 1.7. Płomień dyfuzyjny: 1, 2 — składniki reakcji, 3 — czoło płomienia, 4 — ścianka przewodu oddzielająca składniki reakcji, a — kierunek dyfuzji składnika 2, b — kierunek dyfuzji składnika 1

wydłuża się (dyfundująca w głąb strumienia fluoru część spalin przyspiesza go), a przez to punkt maksymalnej temperatury oddala się od wyłotu palnika. Wiąże się to ze zwiększeniem strat ciepłych (przede wszystkim na promieniowanie) i prowadzi w ten sposób do obniżenia temperatury maksymalnej. W przypadku odwrotnym, gdy prędkość strumienia zewnętrznego jest zbyt mała w stosunku do wewnętrznego, płomień wskutek zmniejszonej prędkości dyfuzji wodoru w kierunku do osi płomienia wydłuża się i straty ciepłe rosną.

1.1.4. Piec martenowski

Piec martenowski jest piecem płomiennym z rekuperacją ciepła spalin służący do wytapiania stali z surówki i złomu stalowego. Składa się on z (rys. 1.8) kilku oddzielonych zespołów mających określone przeznaczenie i pracujących w różnych warunkach. Najważniejszymi z tych zespołów są: część robocza pieca (z przestrzenią roboczą) i regeneratory. Regeneratory służą do wykorzystania ciepła odchodzących spalin do podgrzewania powietrza i paliwa gazowego. Dzięki temu osiąga się potrzebną do wytapiania stali wysoką temperaturę płomienia w przestrzeni roboczej pieca. Opuszczające tę przestrzeń spaliny mają temperaturę rzędu 2000°K . W regeneratorach oddają one część swego ciepła kratownicy ułożonej z cegieł ogniotrwałych i ochładzają się. Gdy następnie przez regeneratory przepuści się paliwo gazowe i powietrze w odwrotnym kierunku, wówczas stykają się one z gorącą kratownicą i zostają podgrzane.



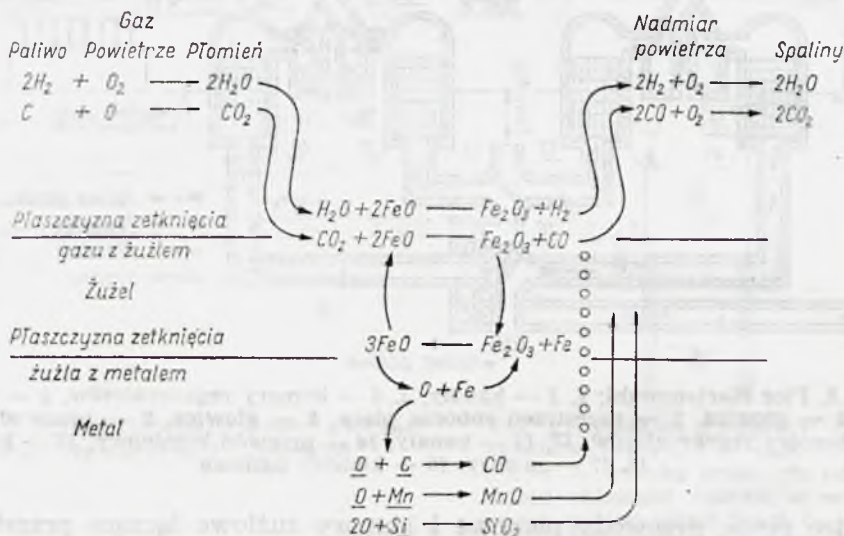
Rys. 1.8. Piec martenowski: 1, 2 — kanały, 3, 4 — komory regeneratorów, 5 — przewód, 6 — głowica, 7 — przestrzeń robocza pieca, 8 — głowica, 9 — przewody, 10, 11 — komory regeneratorów, 12, 13 — kanały, 14 — przewód kominowy, 15 — komin, 16, 17 — zawory, 18 — komory żużłowe

Głowice pieca, przewody pionowe i komory żużłowe łączące przestrzeń roboczą pieca z regeneratorami spełniają zadania pomocnicze. Przewody pionowe i głowice doprowadzają gaz i powietrze z regeneratorów do przestrzeni roboczej pieca oraz odprowadzają z niej spaliny. Oprócz tego głowice spełniają funkcje palników umożliwiając mieszanie paliwa gazowego z powietrzem oraz nadanie płomieniowi właściwego kierunku. Komory żużłowe służą jako osadniki pyłu z przechodzących przez nie spalin; pył ten spaliny porywają w przestrzeni roboczej pieca głównie ze wsadu zapobiegając w ten sposób zatykaniu się kratownic regeneratorów.

Działanie pieca martenowskiego jest następujące: w położeniu urządzeń rozrządczych, jak na rys. 1.8, paliwo gazowe wchodzi do zaworu 16, i dalej kanałem 2 do komory regeneratora 4; tam nagrzewa się do temperatury 1300—1500 °K, a następnie przewodem pionowym 5 przechodzi do głowicy 6, miesza się z powietrzem i spala w przestrzeni roboczej pieca 7. Podobnie powietrze przez zawór 17 wchodzi kanałem 1 do komory regeneratora 3, nagrzewa się w niej i przewodem pionowym 5 dostaje się do głowicy 6, u wylotu której miesza się z paliwem gazowym dostarczając tlenu do jego spalania. Powstałe w ten sposób spaliny oddają swe ciepło materiałom wsadowym (surówka, złom żelazny i składniki żużłotwórcze), które zostają podgrzane a następnie stopione.

Rola spalin w tym procesie nie ogranicza się wyłącznie do podgrzewania wsadu, przeciwnie — współdziałają one czynnie (choć w dużym stopniu pośrednio przez powłokę żużła pokrywającego roztopioną surówkę) w procesie utleniania szkodliwych domieszek zawartych w surówce. Proces ten ilustruje rys. 1.9. W spalinach znajduje się tlen pochodzący z nadmiaru powietrza przy spalaniu. Tlen ten oraz pozostałe aktywne składniki spalin H_2O i CO_2 , stykając się z powierzchnią żużła, utleniają zawarte w nim cząsteczki FeO na wyższe tlenki: Fe_2O_3 i Fe_3O_4 , które dy-

fundują ku powierzchni styku żużla z metalem i reagując tam z żużlem wytwarzają znowu tlenek żelaza FeO . Ten z kolei częściowo pozostaje w żużlu, częściowo zaś przedostaje się do surówki i wchodzi w reakcję z jej szkodliwymi składnikami: węglem, manganem i krzemem. Tak powstałe tlenki tych pierwiastków przechodzą do żużla, lub jak CO , przez żużel do spalin gdzie następuje jego utlenianie na CO_2 .



Rys. 1.9. Przenikanie tlenu ze spalin przez żużel do metalu w piecu martenowskim

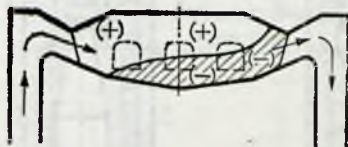
Opuszczając przestrzeń roboczą pieca (rys. 1.8) spaliny uchodzą przez prawą głowicę 8 dwoma oddzielnymi przewodami 9 przez komory żużlowe 18 do komór regeneratorów 10 i 11 i dalej kanałami 12 i 13 przez zawory 16 i 17 do przewodu kominowego 14 i komina 15. Jak wynika z powyższego opisu, paliwo gazowe i powietrze przepływając przez regeneratory 3 i 4 nagrzewają się pobierając ciepło od kratownic, natomiast spaliny uchodzące z przestrzeni roboczej pieca nagrzewają kratownice regeneratorów 10 i 11. Po okresie 10, 20 minut regeneratory 3 i 4 oziębiają się, a nagrzewają regeneratory 10 i 11. Wówczas następuje zmiana kierunku przepływu gazów.

Jako paliwa w piecach martenowskich używa się gazów: ziemnego, koksowniczego, wielkopiecowego oraz czadnicowego, rzadziej stosowane jest paliwo ciekłe.

Paliwo musi spalać się całkowicie w przestrzeni roboczej pieca, a powstały płomień powinien być spokojny i mieć właściwy kierunek, długość i kształt. Dobry płomień jest niezbyt długi, ostry i wąski, nie omywa tylnej ściany i nie odchyła się w kierunku sklepienia. Prawidłowo skierowany na kąpiel, ściela się po niej i zapewnia jej intensywne nagrzanie.

Te wszystkie cechy płomienia uzyskuje się przez nadanie właściwego kształtu głowicy i stosowanie odpowiedniego współczynnika nadmiaru powietrza. Bardzo szkodliwe dla pracy pieca jest zasysanie zimnego powietrza z atmosfery („dzikiego”) przy występowaniu podciśnienia w przestrzeni roboczej. Powoduje to wzrost zużycia paliwa i utrudnia kontrolę właściwego rozkładu temperatur w piecu. Jak widać na rys. 1.10, prze-

strzeń robocza pieca jest podzielona na dwie części powierzchnią izobaryczną, na której ciśnienie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu (powierzchnia zerowa). Przy normalnym usytuowaniu tej powierzchni, w przestrzeni ponad nią panuje nadciśnienie (i dlatego nad zasłonami okien wsadowych widać wydobywanie się płomienia) w przestrzeni pod nią natomiast — podciśnienie (i dlatego pod zasłonami okien występuje niewielkie zasysanie powietrza).



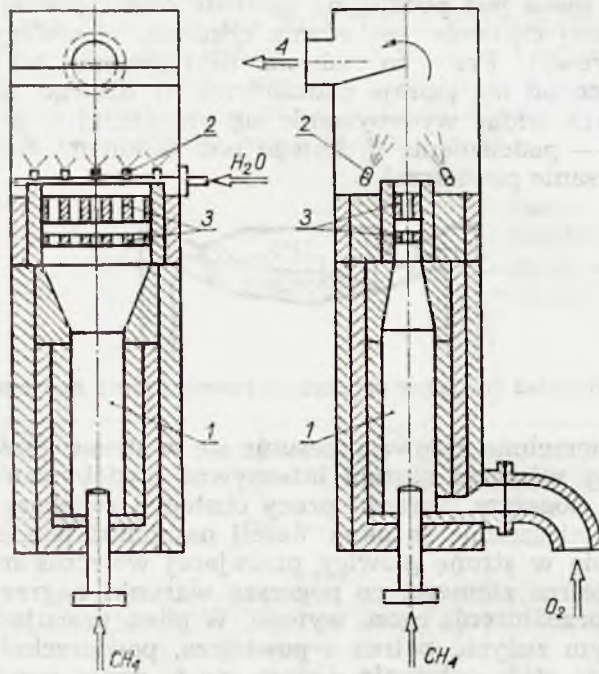
Rys. 1.10. Rozkład ciśnień w przestrzeni roboczej pieca martenowskiego

Jeżeli powierzchnia zerowa przesunie się w stronę głowicy odprowadzającej spaliny wówczas nastąpi intensywne wydobywanie się płomienia z pieca, co pogarsza warunki pracy obsługi i zwiększa zużycie ścian, w której umieszczone są okna. Jeżeli natomiast powierzchnia zerowa przesunie się w stronę głowicy pracującej wówczas następuje silne zasysanie powietrza zimnego, co pogarsza warunki nagrzewania kąpeli i prowadzi do przedłużenia czasu wytopu. W piecu pracującym prawidłowo, przy różnym zużyciu paliwa i powietrza, powierzchnia zerowa powinna zajmować stałe położenie. Osiąga się to przez regulowanie przepływu („ciągu”) za pomocą zasuw kominowej.

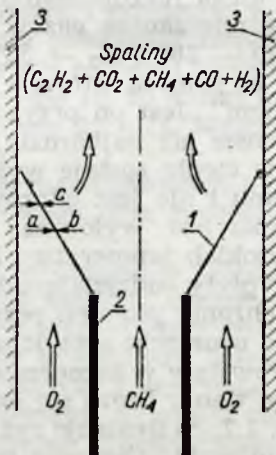
1.1.5. Półspalanie

Jedną z metod otrzymywania acetyleny polega na niezupełnym spalaniu metanu. Metan i tlen, ogrzane uprzednio do temperatury 800°K , doprowadza się do palnika (rys. 1.11) w stosunku objętościowym 16/9. W tych warunkach metan ulega niezupełnemu spalaniu oraz rozkładowi termicznemu. Uzyskuje się mieszaninę gazów o składzie: C_2H_2 — 90%, CO_2 — 5%, CH_4 — 5%, CO — 26%, H_2 — 52% i temperaturze 1700°K , którą następnie chłodzi się za pomocą wtrysku wody. Opisany proces nazywa się często „półspalaniem”. Jest on przykładem zastosowania spalania w technologii i to w sensie jak najbardziej bezpośrednim. Wywiązane bowiem podczas spalania ciepło zostaje wykorzystane jedynie w celu termicznego rozkładu metanu i nie jest odprowadzone na zewnątrz.

Komora spalania palnika jest wyłożona materiałem ceramicznym odpornym na działanie wysokich temperatur. Z podobnego materiału są wykonane też perforowane płyty oddzielające komorę spalania od komory natryskowej. Płyty te chronią płomień przed zalaniem wodą. Otrzymana mieszanina gazów, po usunięciu acetyleny, stanowi wyjściowy produkt do syntezy acetonu. Powstały w komorze spalania płomień jest typu dyfuzyjnego z niedomiarem tlenu. Różni się on od płomienia dyfuzyjnego przedstawionego na rys. 1.7, co ilustruje rys. 1.12. Ze względu bowiem na nadmiar paliwa w stosunku do utleniacza (w tym przypadku czystego tlenu) czoło płomienia (jako miejsce geometryczne punktów o stechiometrycznym składzie mieszanki) jest odchylone od osi przepływu (dyfuzja paliwa jest intensywniejsza od dyfuzji tlenu) i przyjmuje kształt kieliicha.



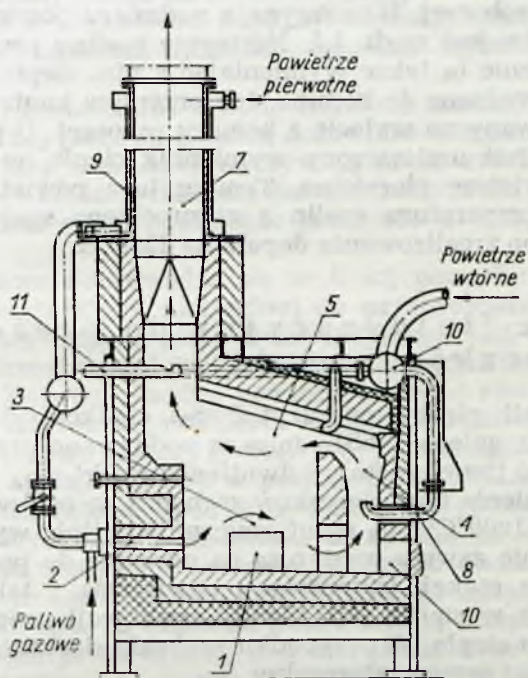
Rys. 1.11. Palnik do niepełnego utleniania metanu na acetylen: 1 — komora spalania, 2 — wtryskiwacze wody, 3 — płyty perforowane zabezpieczające płomień przed zalaniem wodą, 4 — wypływ produktów reakcji



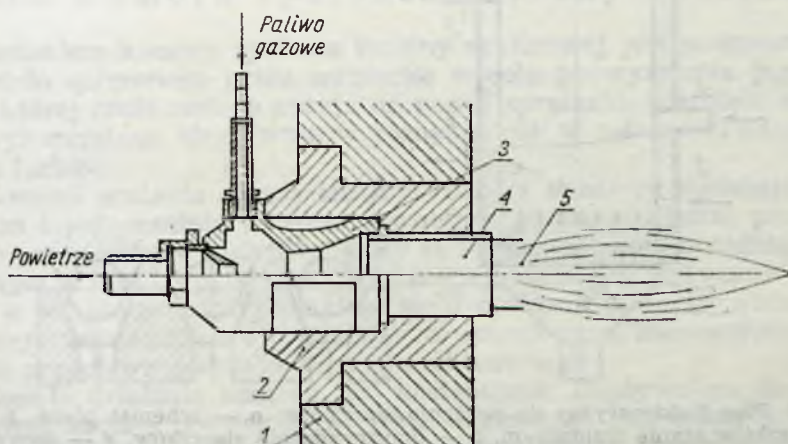
Rys. 1.12. Płomień dyfuzyjny przy niepełnym spalaniu: 1 — czoło płomienia odchylone od osi palnika, 2 — przewód doprowadzający metan, 3 — ścianki komory spalania, a — kierunek dyfuzji tlenu, b — kierunek dyfuzji metanu, c — kierunek dyfuzji spalin

1.1.6. Piec kuźniczy

W przedstawionym na rys. 1.13 piecu kuźniczym do bezzgorzelinowego nagrzewania wsadu jest realizowane spalanie dwustopniowe. Do palników kinetycznych, umieszczonych w tylnej ścianie pieca, są doprowadzane paliwo gazowe i powietrze pierwotne (rys. 1.14) przy współ-



Rys. 1.13. Piec kuźniczy do ogrzewania bezzgorzelinowego: 1 — wsad, 2 — palnik, 3 — płomień pierwotny, 4 — komora ejektorowa, 5 — płomień wtórny (dopalenie), 6 — kolektor powietrza wtórnego, 7 — przewód odprowadzający spaliny, 8 — dysze doprowadzające powietrze wtórne, 9 — wymiennik ciepła, 10 — otwór wsadowy, 11 — dysza ejektora kominowego



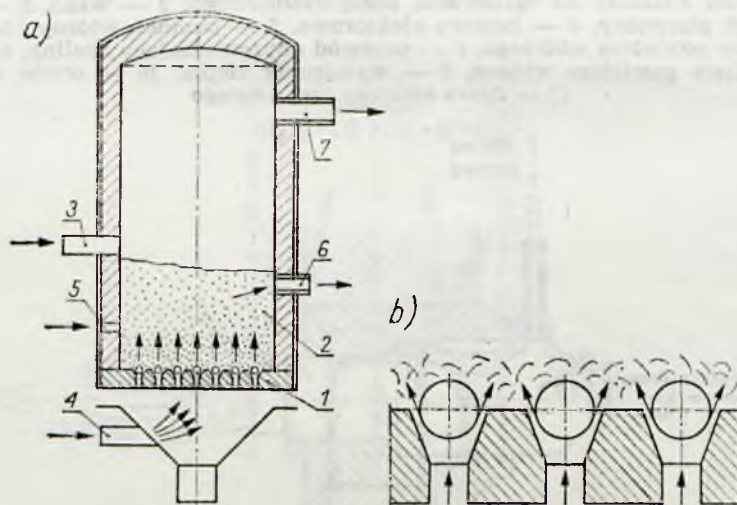
Rys. 1.14. Palnik kinetyczny: 1 — obmurze pieca, 2 — obsada palnika, 3 — dysza Venturiego, 4 — mieszalnik, 5 — płomień kinetyczny

czynnika nadmiaru 0,5. Ssące działanie komory ejekcyjnej usytuowanej nad otworem wsadowym, w której zainstalowano dysze doprowadzające powietrze wtórne, powoduje odpowiednio kontrolowany ruch produktów niezupełnego spalania. Przepływają one nad wsadem (ogrzewają go i zabezpieczają przed korozją) i przez komorę ejekcyjną są doprowadzane pod sklepienie do obszaru dopalania, który stanowi niczym nie oddzieloną część komory roboczej. Współczynnik nadmiaru powietrza, przy jakim zachodzi dopalanie, jest rzędu 1,1. Następnie spaliny promieniując ciepło na wsad i sklepienie (a także wymieniając z nim ciepło na drodze konwekcji) są odprowadzane do kolumny. Ich przepływ kontroluje dodatkowy ejektor zainstalowany na wylocie z komory roboczej. U podnóża przewodu kominowego jest umieszczony wymiennik ciepła, w którym spaliny podgrzewają powietrze pierwotne. Temperatura powietrza pierwotnego wynosi 550°K , temperatura spalin z niezupełnego spalania — 1750°K , ich temperatura po zrealizowaniu dopalania 2250°K .

1.1.7. Piec fluidyzacyjny do prażenia siarczków metali

Siarczki metali: piryt i markazyt (FeS_2), chalkopiryt (CuFeS_2), blenda cynkowa (ZnS), galena (PbS) i inne są poddawane prażeniu utleniającemu, aby uzyskać tlenek metalu i dwutlenek siarki.

Reakcje utleniania tych siarczków zachodzą na ogół w wysokich temperaturach ($600\text{--}1000^{\circ}\text{C}$) i są egzotermiczne, ale ilość wydzielającego się przy tym ciepła nie zawsze wystarcza na ogrzanie do potrzebnej temperatury substratów reakcji (siarczków i powietrza). I tak przy prażeniu siarczków ubogich w siarkę (np. blendy cynkowej) proces prowadzi się z doprowadzaniem ciepła. W przypadku prażenia siarczków bogatych (np. pirytów) proces jest samowystarczalny.



Rys. 1.15. Piec fluidyzacyjny do prażenia siarczków: a — schemat pieca, 1 — dno, 2 — siarczki w stanie fluidalnym, 3 — doprowadzenie siarczków, 4 — doprowadzenie powietrza, 5 — doprowadzenie paliwa, 6 — odprowadzenie fazy fluidalnej, 7 — odprowadzenie gazów, b — przepływ powietrza przez otwory w dnie pieca fluidyzacyjnego

Prażenie utleniające siarczków przeprowadza się w piecach różnego typu między innymi w piecach fluidyzacyjnych. Istota działania takiego pieca polega na utworzeniu w jego komorze roboczej (rys. 1.15) fazy fluidalnej, tzw. pseudofazy, złożonej z przepływającego do góry gazu oraz z zawieszonych i cyrkulujących w nim małych cząstek ciała stałego. Przy odpowiednio dobranym stężeniu cząstek stałych oraz odpowiedniej prędkości przepływu cały układ do złudzenia przypomina wrzącą ciecz i rzeczywiście ma wiele właściwości fizycznych cieczy: charakterystyczną dla cieczy ruchliwość, ciśnienie hydrostatyczne oraz wyraźną górną powierzchnię graniczną.

Wysuszone i dostatecznie drobno zmielone siarczki są doprowadzone do komory roboczej pieca za pomocą dozownika ślimakowego. Tlenki metalu w postaci fazy fluidalnej wypływają przez króciec znajdujący się w bocznej ścianie komory roboczej poniżej zwierciadła pseudofazy. Gazy odlotowe natomiast są odprowadzane przez otwór umieszczony w górnej części pieca.

Paliwo gazowe doprowadza się w ilości potrzebnej do utrzymania odpowiedniej temperatury niezbędnej do przeprowadzenia utleniania.

Najważniejszą częścią pieca fluidyzacyjnego jest dno jego komory roboczej, przez które przepływa powietrze niezbędne do wytwarzania stanu fluidalnego. Konstrukcja dna powinna ułatwiać równomierny rozdział powietrza w przekroju poprzecznym komory i uniemożliwiać przesypywanie się materiału do komory powietrznej pod dnem.

Najczęściej stosuje się dno w postaci płyty o dużej liczbie otworów cylindrycznych lub stożkowych (rys. 1.15b). W otworach znajdują się kule, które są wykonane z materiału odpornego na działanie wysokiej temperatury. Pod wpływem ciśnienia powietrza unoszą się one do góry i przepuszczają je dołem do ładunku fluidalnego znajdującego się w piecu. W przypadku spadku ciśnienia kule osiadają i zapobiegają przesypywaniu się ładunku przez otwory pod dno pieca. Przy takiej konstrukcji dna powietrze dopływa do komory w postaci dużej liczby strumieni, które spotykają się ze sobą i tworząc wiry wprowadzają w stan fluidalny materiał syпки.

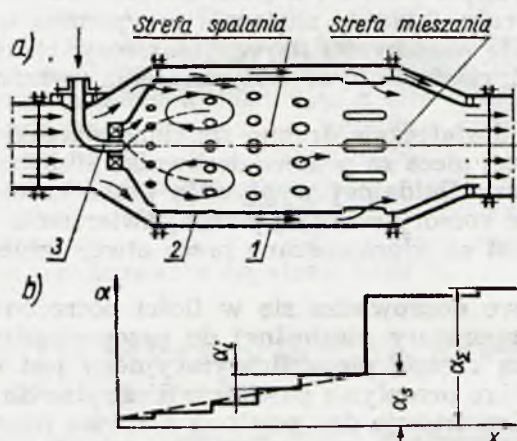
1.1.8. Komora spalania turbiny spalinowej

Zadaniem komory spalania turbiny spalinowej jest podgrzanie gazu uprzednio sprężonego przez sprężarkę w celu podwyższenia jego entalpii, z której część zostaje zużyta na napęd sprężarki, pozostała zaś może być wykorzystana efektywnie w różny sposób w zależności od przeznaczenia turbiny.

Komora spalania składa się (rys. 1.16) z obudowy spełniającej rolę kadłuba i jednocześnie płaszcza zewnętrznego dla powietrza przepływającego przez komorę oraz płomienicy ze stożkową ścianą przednią z umieszczonym w niej rozpylaczem. W ścianach płomienicy wykonane są otwory, a w ścianie przedniej znajduje się dodatkowo zawirowywacz, to jest pierścieniowa szczelina z promieniowo ustawionymi kierownicami, które nadają przepływającemu powietrzu ruch wirowy.

Zasada działania komory jest następująca. Dopływające do komory powietrze zostaje podzielone na dwa strumienie: pierwotny i wtórny. Strumień pierwotny przechodzi przez zawirowywacz, zostaje w nim wprowadzony w ruch wirowy i miesza się z równocześnie wtrysniętym, rozpy-

lonym i odparowującym strumieniem paliwa. W ten sposób powstaje mieszanka, która następnie spala się w miarę wzbogacania jej w tlen przez stopniowo wpływający do płomienicy strumień powietrza wtórnego (rys. 1.16b). Reszta tego powietrza służy do ochłodzenia otrzymanych w procesie spalania spalin z temperatury 1900—2200°K do 1050—1250°K.

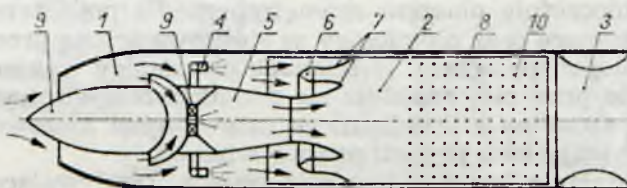


Rys. 1.16. Komora spalania turbiny spalinowej *a* — schemat komory: 1 — obudowa, 2 — płomienica, 3 — wtryskiwacz paliwa, 4 — zawirowywacz, α — współczynnik nadmiaru powietrza, *b* — rozkład współczynnika nadmiaru powietrza wzdłuż osi komory, α_i — zmiana współczynnika nadmiaru powietrza w wyniku napływu powietrza wtórnego przez określoną grupę otworów, α_s — współczynnik nadmiaru powietrza, przy którym zostało zakończone spalanie, α_Σ — ogólny współczynnik nadmiaru powietrza (po zakończeniu mieszania)

Ruch wirowy powietrza pierwotnego wskutek działania siły odśrodkowej powoduje jego przyleganie do ścianek przedniej części płomienicy. W osi komory natomiast, tuż za wtryskiwaczem, powstaje z tego powodu podciśnienie, którego następstwem jest cyrkulacja gorących gazów ze strefy spalania ku przodowi. Podgrzewają one napływającą świeżą mieszankę i powodują jej zapłon. W ten sposób uzyskuje się ustateczniony przebieg spalania w komorze.

1.1.9. Silnik strumieniowy

Silnik strumieniowy (rys. 1.17) należy do rodziny lotniczych silników odrzutowych. Składa się z trzech zasadniczych zespołów: dyfuzora, ko-



Rys. 1.17. Silnik strumieniowy: 1 — dyfuzor, 2 — komora spalania, 3 — dysza, 4 — wtryskiwacze paliwa, 5 — komora pilotująca, 6 — statecznik płomienia, 7 — czoło płomienia, 8 — ekran, 9 — rdzeń dyfuzora, 10 — otwory w ekranie

mory spalania i dyszy. Ruch silnika względem atmosfery powoduje w nim przepływ powietrza, które zostaje sprężone w dyfuzorze, podgrzane w komorze spalania i rozprężone w dyszy. Różnica prędkości w przekrojach wlotowym i wylotowym, wyrażająca się przyrostem ilości ruchu powietrza przepływającego przez silnik, daje siłę działającą na ścianki silnika, która może być następnie wykorzystana do napędu samolotu lub pocisku.

Komora spalania silnika ma kształt cylindra łączącego dyfuzor z dyszą. W jej części przedniej są umieszczone wtryskiwacze paliwa oraz komora pilotująca stanowiąca przedłużenie rdzenia dyfuzora, który służy do wytwarzania skośnych fal uderzeniowych w przypadku naddźwiękowej prędkości lotu. Komora pilotująca jest wykonana na wzór płomienicy komory turbiny spalinowej. Jej zadaniem jest ułatwienie zapłonu oraz ustępcznianie płomienia w głównym strumieniu mieszanki palnej realizowane za pomocą gorących spalin. Inną, wspomnianą już w opisie komory turbiny spalinowej, metodę ustępczniania za pomocą wirów cyrkulacyjnych urzeczywistnia statecznik pierścieniowy umieszczony tuż za komorą pilotującą.

Mieszanka palna powstaje przez wtrysk paliwa w strumień przepływającego powietrza. Ulega ono rozpyleniu, odparowaniu i wymieszaniu z powietrzem. W przekroju statecznika otrzymuje się zasadniczo mieszanekę ujednoliconą i w dużym stopniu odparowaną.

Po zapłonie powstaje w komorze płomień kinetyczny inicjowany w sposób ciągły z jednej strony przez strugę gorących spalin wydobywających się z komory pilotującej z drugiej zaś przez strefę cyrkulacji za statecznikiem pierścieniowym.

W przepływającym przez cylindryczną komorę gazie powstają drgania akustyczne (które w sprzyjających warunkach mogą ulec wzmocnieniu) wywołujące pulsacje prędkości i ciśnienia i powodujące zaburzenia w przebiegu spalania o na ogół negatywnych konsekwencjach.

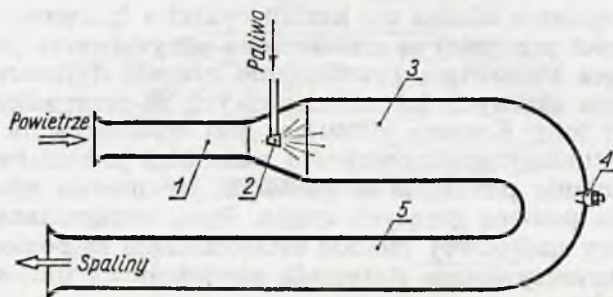
Stosując odpowiednie zabiegi można je wytłumić w zarodku. Jednym z takich zabiegów jest zastosowanie ekranu wykonanego z cienkiej, żaroodpornej blachy stalowej, w której zrobiono szereg rzędów gęsto na obwodzie rozmieszczonych otworów o stosunkowo niewielkiej średnicy. Między ekranem i ścianką komory jest zostawiona szczelina, którą płynie zimne powietrze. W wyniku istnienia różnicy ciśnień w szczelinie i wewnątrz komory (ze względu na doprowadzanie ciepła ciśnienie we wnętrzu jest niższe niż w szczelinie) powietrze ze szczeliny przepływa do wnętrza przez otwory w ekranie. Jeśli w komorze spalania wystąpią pulsacje ciśnienia to przepływ ten będzie ulegał pewnym, przesuniętym w czasie, zakłóceniom. Zakłócenia te w sprzyjających warunkach mogą oddziaływać tłumiąco na mechanizm wzmacniający drgania akustyczne i w ten sposób wpływać na zmniejszenie lub nawet całkowite wyeliminowanie pulsacji ciśnienia w komorze.

Dodatkowa rola jaką spełnia ekran polega na chronieniu ścianek komory przed bezpośrednim oddziaływaniem płomienia i gorących spalin.

1.1.10. Silnik pulsacyjny

Silnik pulsacyjny, podobnie jak poprzednio opisany silnik strumieniowy, należy do grupy lotniczych silników odrzutowych. Składa się on (rys. 1.18) z trzech zasadniczych zespołów: przewodu wlotowego spełnia-

jącego rolę zaworu aerodynamicznego, komory spalania z wtryskiwaczem paliwa i świecą zapłonową oraz dyszy. Paliwo wtryskiwane w sposób ciągły do komory spalania tworzy z powietrzem mieszankę palną, która zapala się od iskry elektrycznej wywołanej przez świecę zapłonową. Powstałe w następstwie tego spaliny wypływają równocześnie przez przewód wlotowy i dyszę. Wskutek bezwładności strug opuszczających



Rys. 1.18. Silnik pulsacyjny: 1 — zawór aerodynamiczny, 2 — wtryskiwacz, 3 — komora spalania, 4 — świeca, 5 — dysza

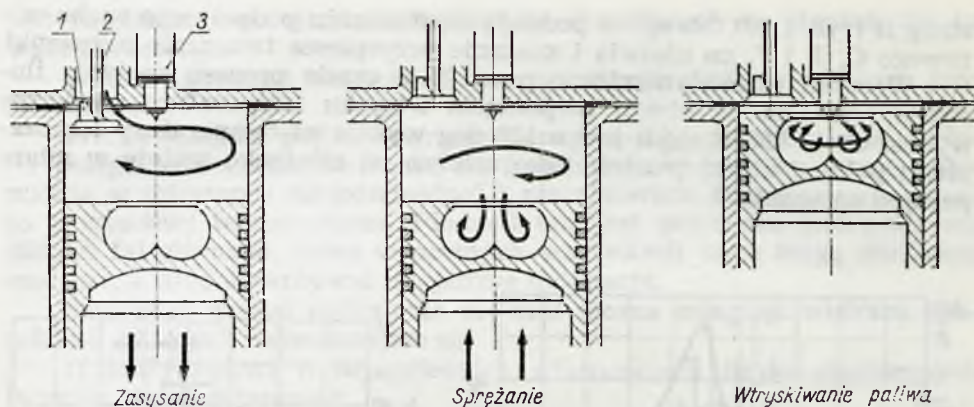
silnik ich wypływ nie kończy się z chwilą wyrównania się ciśnień w komorze spalania i otaczającej atmosferze. W wyniku nadal trwającego wypływu w komorze powstaje podciśnienie, które oczywiście oddziałuje hamująco na wypływ. Ponieważ bezwładność strugi wypływającej przez przewód wlotowy jest mniejsza niż strugi wypływającej przez dyszę (gdyż wymiary dyszy są większe) tam najpierw następuje wyhamowanie wypływu i do komory od strony wlotu zaczyna napływać świeże powietrze atmosferyczne. Powietrze to mieszając się z rozpylanym paliwem tworzy świeżą mieszankę, która wypełnia komorę, a następnie zapala się od resztek gorących spalin pozostałych w silniku po poprzednim obiegu.

Istotną cechą procesu spalania zachodzącego w komorze silnika pulsacyjnego jest zmienność warunków w jakich on zachodzi. Mieszanka palna zawiera domieszki spalin, jest niejednorodna i nie całkowicie odparowana. Czoło płomienia zainicjowane na granicy z gorącymi spalinami obejmuje poruszającą się z różną prędkością i w różnym stopniu zawirowaną mieszankę.

Prędkość przemieszczania się czoła płomienia wzrasta i dochodzi w końcu spalania do kilkuset m/s. Powoduje to wzrost ciśnienia w komorze mimo istniejącej możliwości wypływu spalin. Takie połączenie gwałtownie przebiegającego procesu spalania ze wzrostem ciśnienia nazywa się *w y b u c h e m*. Wybuchy powtarzające się z określoną częstotliwością, zależną od długości silnika i temperatury spalin, charakteryzują pracę silnika pulsacyjnego.

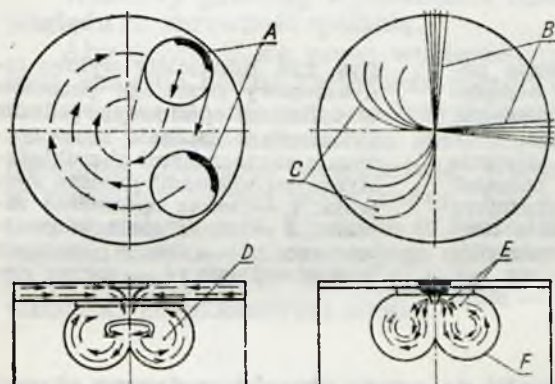
1.1.11. Spalinowy silnik tłokowy o zapłonie samoczynnym

Działanie spalinowego silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym ilustrują szkice na rys. 1.19. Wybrany przykład charakteryzuje się wtryskiem bezpośrednim oraz toroidalną komorą spalania w denku tłoka. Powietrze wchodzące do cylindra podczas suwu ssania zostaje wprowadzo-

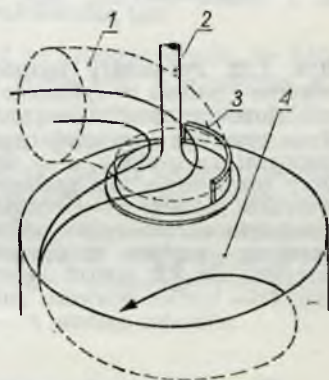


Rys. 1.19. Spalinowy silnik tłokowy o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa

ne w ruch wirowy przez odpowiednio ukształtowane grzybki zaworów ssących (rys. 1.19, 1.20 i 1.21). Ruch ten zostaje zachowany podczas następnego suwu i utrzymuje się w powietrzu, które w miarę postępu sprężania przechodzi do wnętrza w tłoku spełniającej funkcję komory spalania.



Rys. 1.20. Zasada działania komory spalania o kształcie toroidalnym: A — przesłonki zaworu ssącego, B — wypływ paliwa z otworków wtryskiwacza, C — zawirowanie strug paliwa przez ruch wirowy w płaszczyźnie prostopadłej do osi cylindra, D — powstanie toroidalnego ruchu wirowego w komorze spalania, E i F — zawirowanie strug paliwa przez wir toroidalny



Rys. 1.21. Zawirowanie powietrza wywołane działaniem przesłonki zaworu ssącego: 1 — przewód ssący, 2 — zawór ssący, 3 — przesłonka, 4 — wnętrze cylindra

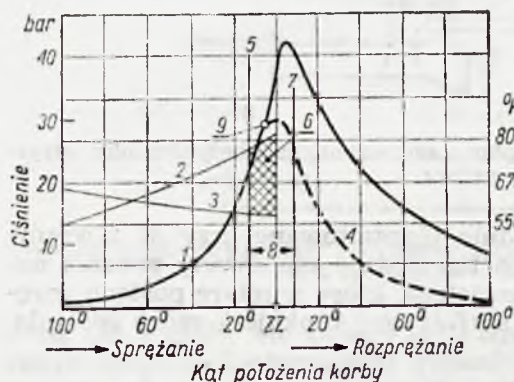
To przejście powietrza z cylindra do komory wiąże się z powstaniem w jej wnętrzu dodatkowego wiru toroidalnego. Powstanie tego wiru jest następstwem zmiany promieniowego ruchu powietrza w przestrzeni między płaską częścią powierzchni denka tłoka i płaską głowicą na ruch wirowy (w płaszczyźnie osi cylindra) w komorze spalania (rys. 1.20).

W ten sposób zamknięty w komorze spalania ładunek sprężonego powietrza znajduje się w podwójnym ruchu wirowym.

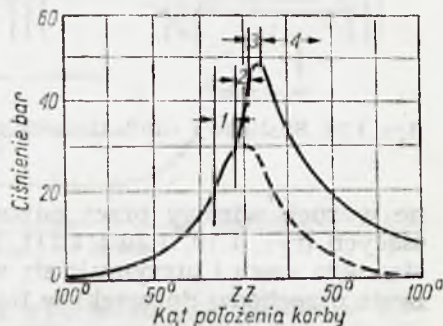
Przy końcu suwu sprężania w to podwójnie zawirowane powietrze zostaje wtrysnięta dawka paliwa (oleju napędowego) w postaci kilku

strug *B* (rys. 1.20). Strugi te poddają się działaniu podwójnego ruchu wirowego *C*, *E* i *F*, co ułatwia i znacznie przyspiesza tworzenie mieszanki.

Warunki termodynamiczne przed i w czasie procesu spalania ilustruje rys. 1.22. W chwili rozpoczęcia wtrysku temperatura powietrza wynosi około 750°K czyli jest o 130 deg wyższa od temperatury samozapłonu paliwa, której wartość jako zależna od ciśnienia, maleje w miarę postępu sprężania.



Rys. 1.22. Parametry termodynamiczne powietrza i paliwa w cylindrze silnika o zapłonie samoczynnym: 1 — przebieg ciśnienia, 2 — przebieg temperatury zapłonu, 3 — przebieg ciśnienia przy rozprężaniu bez spalania, 4 — przebieg ciśnienia przy rozprężaniu z zapłonem, 5 — początek wtrysku paliwa, 6 — różnica temperatury powietrza sprężonego w cylindrze oraz temperatury zapłonu w okresie od początku wtrysku do ZZ (zwrot zewnętrzny wg rys. 1.3), 7 — koniec wtrysku paliwa, 8 — okres wtrysku paliwa, 9 — zapłon



Rys. 1.23. Rozwinięty wykres indykatorowy przebiegu procesów w cylindrze spalinyowego silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym z zaznaczonymi charakterystycznymi okresami procesu spalania: 1 — okres opóźnienia zapłonu, 2 — okres spalania gwałtownego, 3 — okres spalania kontrolowanego, 4 — okres dopalania

Proces spalania można podzielić na cztery charakterystyczne okresy (rys. 1.23):

1) opóźnienie zapłonu — okres od początku wtrysku do chwili wystąpienia samozapłonu;

2) spalanie gwałtowne — okres szybkiego narastania ciśnienia w wyniku spalania się paliwa nagromadzonego w okresie opóźnienia zapłonu;

3) spalanie kontrolowane — okres, w którym paliwo spala się stopniowo w miarę wtrysku do komory spalania;

4) dopalanie — okres, w którym następują końcowe reakcje utleniania cząstek paliwa niespalonego w poprzednich okresach, przede wszystkim wskutek niewłaściwego wymieszania z powietrzem.

Okres opóźnienia zapłonu ma zasadniczy wpływ na przebieg procesu spalania w następnym okresie.

Im opóźnienie trwa dłużej tym więcej paliwa gromadzi się w tym czasie w cylindrze i tym gwałtowniejsze jest potem spalanie. Uzewnętrznia się to między innymi w szybkim narastaniu ciśnienia, którego miarą

jest twardość biegu silnika określona w atmosferach na stopień obrotu wału korbowego.

Wzrost twardości biegu zmniejsza żywotność silnika i zwiększa jego hałaśliwość.

Proces spalania paliwa nagromadzonego w okresie opóźnienia zapłonu polega na rozprzestrzenianiu się gwałtownie przyspieszającego płomienia w mieszance niejednorodnej i niecałkowicie odparowanej, ale za to o wysokiej temperaturze. Płomień ten jest powodem tworzenia się silnych fal ciśnienia, które w pewnych warunkach same mogą inicjować spalanie, a więc wywoływać miejscowe detonacje.

Skrócenie okresu opóźnienia zapłonu można osiągnąć wieloma sposobami, z których najważniejsze są:

1) dobór paliwa o odpowiednich własnościach fizyko-chemicznych (wysoka liczba cetanowa);

2) podniesienie temperatury sprężonego powietrza w cylindrze (wysoki stopień sprężania);

3) zastosowanie izolacji cieplnej w części komory spalania w celu stworzenia gorących powierzchni miejscowo podgrzewających mieszankę;

4) polepszenie warunków tworzenia się mieszanki (polepszenie rozpylania i uintensywnienie zawirowania).

Właściwy przebieg wytwarzania mieszanki jest istotny także i ze względu na sprawność spalania.

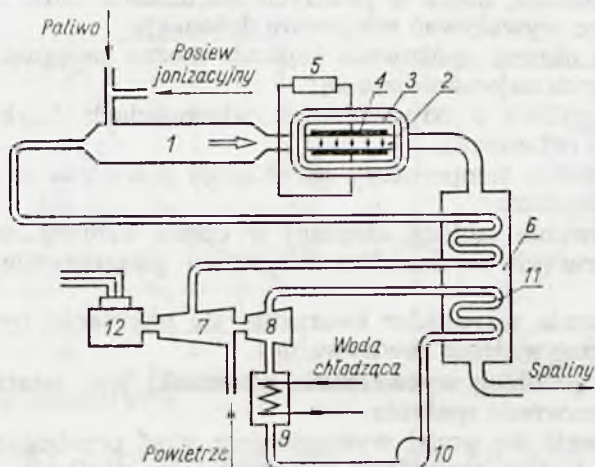
Aby uchronić się przed wystąpieniem stref przebogaconych, w których spalanie będzie oczywiście niezupełne, w silnikach, o zapłonie samoczynnym stosuje się współczynniki nadmiaru powietrza rzędu 1,15—1,4. Ale i to nie zabezpiecza spalania zupełnego, gdy proces tworzenia mieszanki przebiega niewłaściwie. Ujawnia się on przez występowanie w spalinach dużych ilości sadzy, która nadaje im charakterystyczne ciemne zabarwienie. Zjawisko to zachodzi głównie przy zwiększonym obciążeniu silnika, a początek jego ujawniania się stanowi tak zwaną granicę dymienia, która jest jedną z wielkości charakteryzujących własności eksploatacyjne silnika.

1.1.12. Komora spalania generatora magnetogazodynamicznego

Generator magnetogazodynamiczny służy do bezpośredniej przemiany energii cieplnej w elektryczną. Schemat siłowni elektrycznej opartej o działanie tego generatora przedstawiono na rys. 1.24. Zasadniczym zespołem przetwarzającym energię jest kanał magnetogazodynamiczny. Płynąca przez niego plazma, przecinając linie sił pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę obejmującą przekrój kanału, indukuje siłę elektromotoryczną i wywołuje w ten sposób przepływ prądu w obwodzie elektrycznym, z którym kontaktuje się poprzez elektrody tworzące boczne ścianki kanału.

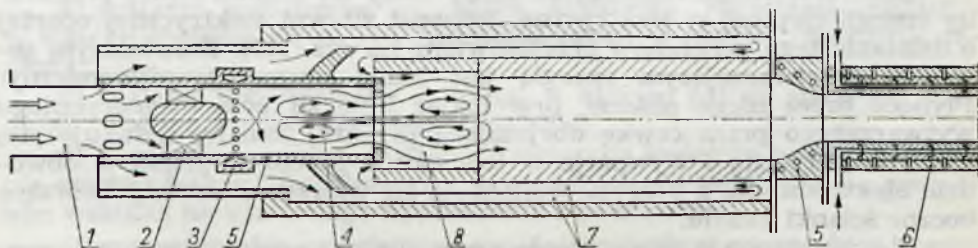
Plazmę stanowią silnie zjonizowane spaliny produkowane w komorze spalania. Czynnikiem jonizującym jest działanie wysokiej temperatury przy współdziale posiewu jonizującego czyli składników obniżających potencjał jonizacyjny gazu. Jako posiewu używa się najczęściej metali alkalicznych (potas, cez, sód).

Wysoką temperaturę spalin uzyskuje się doprowadzając do komory spalania podgrzane powietrze lub, co jest mniej ekonomiczne, wzbogacając powietrze czystym tlenem. Podgrzewanie powietrza odbywa się w wymienniku ciepła, do którego są doprowadzone gorące spaliny opuszczające kanał magnetogazodynamiczny. Ten sam wymiennik służy jako generator pary dla turbiny napędzającej sprężarkę, która zasila komorę spalania sprężonym powietrzem. Nadmiar mocy turbiny zużytkowuje się na napęd konwencjonalnej prądnicy.



Rys. 1.24. Schemat siłowni magnetogazodynamicznej o obiegu otwartym: 1 — komora spalania, 2 — kanał magnetogazodynamiczny, 3 — cewka magnetyczna, 4 — elektrody, 5 — odbiornik prądu elektrycznego, 6 — podgrzewacz powietrza, 7 — sprężarka, 8 — turbina parowa, 9 — skraplacz pary, 10 — pompa, 11 — parownica, 12 — konwencjonalny generator prądu elektrycznego

Schemat komory spalania przedstawiono na rys. 1.25. Do komory dopływa gorące powietrze o temperaturze 1300°K i wyższej. Pewna część powietrza przechodzi otworami do płaszcza chłodzącego, pozostałe natomiast zostaje wprowadzone przez zawirowywacz w ruch wirowy i miesza się z paliwem ciekłym (np. naftą) tworzącym ciekłą warstwę na ściankach przedniej części komory. Paliwo jest tam wprowadzone pod niewielkim ciśnieniem z kolektora przez szereg małych otworków. W ten sposób wytworzona mieszanka palna zostaje wzbogacona w tlen przez



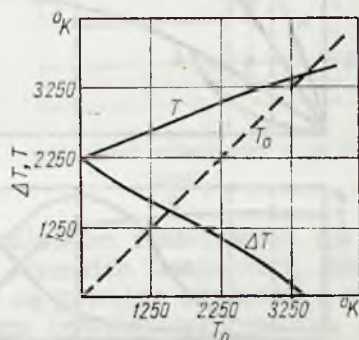
Rys. 1.25. Komora spalania generatora magnetogazodynamicznego: 1 — kanał doprowadzający gorące powietrze, 2 — zawirowywacz, 3 — kolektor doprowadzający paliwo do komory, 4 — wir cyrkulacyjny, 5 — dysza, 6 — kanał generatora magnetogazodynamicznego, 7 — kanały powietrza chłodzącego, 8 — strefa ustępcznienia płomienia, 9 — chłodzenie kanału generatora magnetogazodynamicznego

zmieszanie z powietrzem chłodzącym, co następuje w strefie ustaleczania płomienia. W strefie tej powstaje wir cyrkulacyjny, który przenosi gorące spaliny z wnętrza komory aż w okolice zawirowywacza.

Temperatura spalin osiąga wartość rzędu 2800°K i wyższej. Tak wysokie temperatury wymagają stosowania materiałów wyjątkowo odpornych na ich działanie. Jednym z nich jest np. tlenek magnezu.

Posiew jonizacyjny odprowadza się albo po zakończeniu spalania przez wtrysk do dyszy (gdy zachodzi niebezpieczeństwo, że mógłby źle oddziaływać na materiał ścianek komory), lub też przez wstępne zmieszanie z paliwem.

Należy zwrócić uwagę, że w tej komorze spaliny, wskutek wysokiej temperatury powietrza, są nie tylko zjonizowane ale także w dużym stopniu zdysocjowane. Jest to o tyle istotne, że dysocjacja jako proces endotermiczny obniża końcową temperaturę spalin, a przez to również sprawność spalania.



Rys. 1.26. Przyrost temperatury wskutek spalania ΔT oraz temperatura spalania T w zależności od początkowej temperatury mieszanki T_0

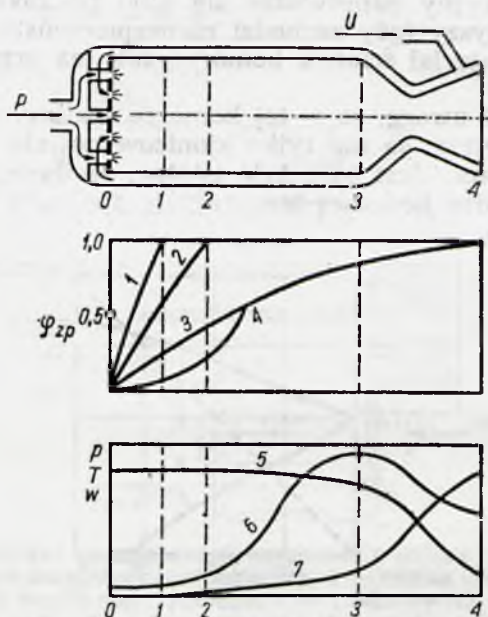
Wpływ początkowej temperatury powietrza na końcową temperaturę spalin dla stechiometrycznej mieszanki powietrza z naftą ilustruje wykres na rys. 1.26. Poczynając od temperatury rzędu 3500°K zaczyna się obszar, w którym egzotermiczna reakcja przechodzi w endotermiczną, a temperatura spalin staje się niższa od początkowej temperatury powietrza. Proces spalania w tym przypadku jest bardzo złożony także i przez to, że w wysokiej temperaturze, dysocjacji, a nawet częściowej reakcji ulegają składniki powietrza: tlen i azot.

1.1.13. Silnik raketowy na ciekły materiał pędny

Schemat zasadniczego zespołu silnika raketowego na ciekły materiał pędny, to jest komorę spalania z dyszą, przedstawiono na rys. 1.27. W skład materiału pędnego zasilającego silnik wchodzi: paliwo i utleniacz, obydwa w stanie ciekłym.

Utleniacz (np. ciekły tlen lub kwas azotowy) jest doprowadzany do rozpylaczy umieszczonych w głowicy przez płaszcz chłodzący dyszę i komorę. W głowicy znajdują się także rozpylacze paliwa (którym może być np. nafta lub spirytus metylowy) zasilane wprost z kolektora stanowiącego integralną część głowicy.

Paliwo i utleniacz wtrysnięte do komory spalania ulegają rozpyleniu, odparowaniu, zmieszaniu i wreszcie spalaniu. Ponieważ procesy te zachodzą kolejno, w czasie przepływu cząstek materiału pędnego wzdłuż silnika w kierunku wylotu, można więc dokonać podziału komory spalania na odpowiednie strefy. Strefa rozpylania znajduje się bezpośrednio obok głowicy. Jej długość zależy przede wszystkim od rodzaju wtryski-



Rys. 1.27. Schemat działania silnika rakietowego na ciekły materiał pędny: 0, 1, 2, 3, 4 — charakterystyczne przekroje rozdzielające poszczególne strefy silnika, U — utleniacz, P — paliwo, φ_{zp} — stopień zaawansowania procesu

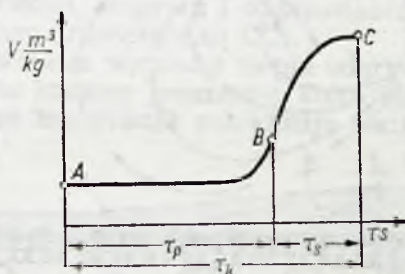
waczy oraz od sposobu ich rozmieszczenia. W następnej strefie rozpylony materiał pędny zostaje podgrzany przez gorące spaliny, odparowany oraz częściowo wymieszany, a nawet w pewnym procencie spalony. W strefie trzeciej kontynuowany jest proces mieszania i uintensywniana reakcja spalania. W części końcowej tej strefy prędkość spalania jest uwarunkowana szybkością procesu tworzenia się mieszanki.

Procesy mieszania, odparowania i spalania przebiegają następująco. Wokół powierzchni każdej z kropli tworzy się warstwa pary nasyconej, przy czym szybkość odparowania jest regulowana szybkością dyfuzji. W rezultacie wymiany ciepła ze strefą spalania temperatura powierzchni kropli rośnie, co przyspiesza ich odparowanie. Jeśli krople nie zdążą odparować nim osiągną strefę spalania, wtedy reakcja chemiczna wystąpi w pobliżu ich powierzchni, i to niezależnie od tego, czy to będzie kropla utleniacza, czy też paliwa.

Te wyszczególnione powyżej przemiany mieszanki palnej, od chwili jej wtrysnięcia aż do chwili wylotu w postaci gorących spalin, charakteryzuje czas przebywania w komorze będący sumą czasów pojedynczych procesów.

Jeśli założy się, że miarą postępu procesu jest wzrost objętości właściwej mieszanki, to podany na rys. 1.28 wykres przedstawia szybkość

przemian w komorze. W punkcie A materiał pędny zostaje wtrysnięty, następnie miesza się, paruje i zapala w punkcie B. Między punktami B i C zachodzi spalanie, przy czym punkt C oznacza początek wypływu gorących spalin z komory. Całkowity czas przebywania w komorze τ_k można więc traktować jako sumę czasów przygotowania τ_p i spalania τ_s . Wartości tych czasów zależą od układu wtryskowego, właściwości mieszanki oraz od parametrów termodynamicznych panujących w komorze. Mają one istotny wpływ na podstawowy parametr konstrukcyjny silnika, a mianowicie długość, a przez to także i objętość komory spalania.



Rys. 1.28. Zmiana objętości właściwej mieszanki v w komorze spalania w funkcji czasu τ

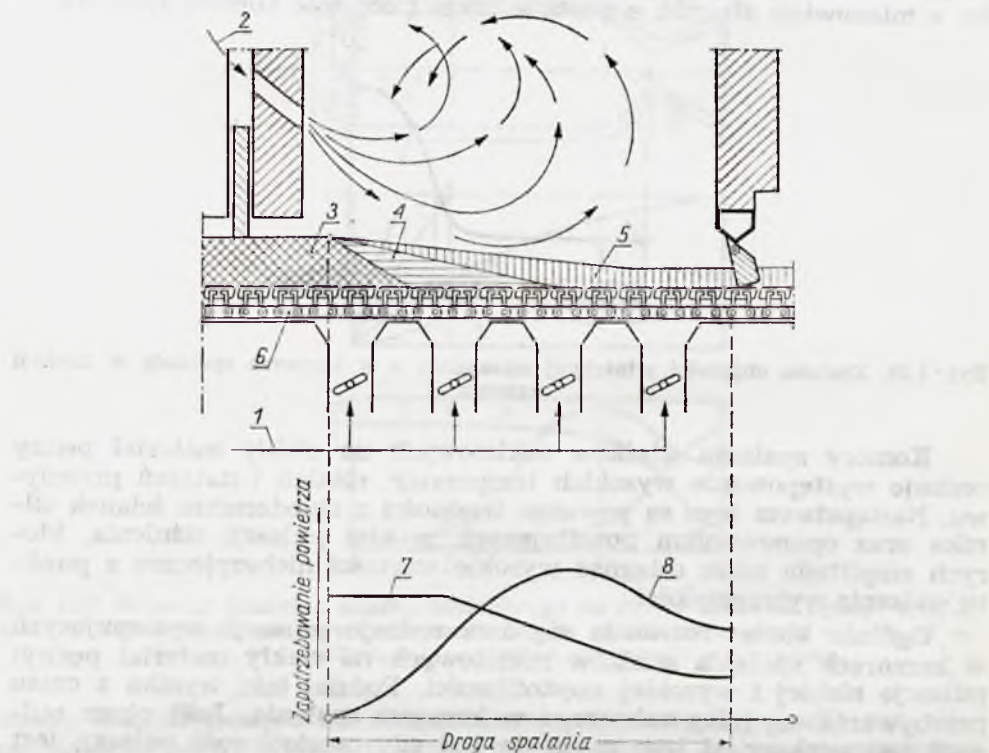
Komory spalania silników rakietowych na ciekły materiał pędny cechuje występowanie wysokich temperatur, ciśnień i natężeń przepływu. Następstwem tego są poważne trudności z chłodzeniem ścianek silnika oraz opanowaniem powstających w nim pulsacji ciśnienia, których amplituda może osiągnąć wysokie wartości niebezpieczne z punktu widzenia wytrzymałości.

Ogólnie biorąc rozróżnia się dwa rodzaje pulsacji występujących w komorach spalania silników rakietowych na ciekły materiał pędny: pulsacje niskiej i wysokiej częstotliwości. Podział taki wynika z czasu przebywania czynnika roboczego w komorze spalania. Jeśli okres pulsacji jest większy od tego czasu, to jest gdy częstotliwość pulsacji jest mniejsza od częstotliwości mu odpowiadającej, wtedy w wahaniach bierze udział objętość całej komory. W przypadku przeciwnym, w komorze występuje rozchodzenie się fal ciśnienia. Wykryto i opisano szereg mechanizmów wywołujących te pulsacje. Wszystkie one są oparte na istnieniu opóźnienia zapłonu, które przesuwają w fazie procesy wytwarzania spalin w komorze oraz ich wypływu przez dyszę. Prowadzi to do wzmocnienia nieznacznych nawet naruszeń równowagi między tymi procesami i wystąpienia okresowych, dużych zmian ciśnienia w komorze.

1.1.14. Palenisko warstwowe

Paleniska kotłowe dzielą się na warstwowe i palnikowe. Paleniska warstwowe cechuje spalanie paliwa stałego (węgla) leżącego na ruszcie. Najbardziej rozpowszechnionym typem paleniska warstwowego w kotłach przemysłowych jest palenisko z mechanicznym rusztem taśmowym. Przebieg spalania na takim palenisku przedstawiono schematycznie na rys. 1.29.

Prędkość przesuwania się rusztu jest dostosowana do szybkości procesów zachodzących w palenisku. Przesuwająca się warstwa węgla ulega stopniowemu nagrzaniu, suszeniu, odgazowaniu i wreszcie zgazowaniu czyli powierzchniowemu utlenianiu na CO. W ten sposób na ruszcie powstają strefy wyróżniające się charakterystycznym dla nich procesem. Przez ruszt i leżącą na nim warstwę węgla przepływa powietrze pierwotne, którego zapotrzebowanie w poszczególnych strefach jest



Rys. 1.29. Przebieg spalania w palenisku warstwowym z mechanicznym rusztem taśmowym: 1 — powietrze pierwotne, 2 — powietrze wtórne, 3 — strefa nagrzania i suszenia, 4 — strefa odgazowania, 5 — strefa zgazowania, 6 — ruszt, 7 — węgiel gazowy, 8 — antracyt

zmienne i może być regulowane. Bierze ono udział w spalaniu odgazowanych z węgla części lotnych oraz w utlenianiu węgla na CO, a następnie w spalaniu CO na CO₂. Charakterystyczną zmianę zapotrzebowania powietrza wzdłuż rusztu dla dwu ekstremalnie różnych pod względem właściwości węgla: gazowego i antracytu przedstawiono na wykresie na rys. 1.29.

Szybkość przebiegu poszczególnych procesów zależy przede wszystkim od grubości warstwy, właściwości i sortymentu węgla oraz temperatury i natężenia przepływu powietrza.

Proces spalania zapoczątkowuje zapłon ciężkich węglowodorów (produkty odgazowania węgla) w temperaturze 520—670°K. Wyzwolone w ten sposób ciepło powoduje zapalenie koksu (węgiel odgazowany), którego utlenianie przebiega tym trudniej im dalej posunięte jest od-

gazowanie. Ale właśnie palenie się pozostałości koksowej jest najważniejsze w całym przedsięwzięciu. Dlatego należy stworzyć takie warunki, aby proces ten mógł przebiegać z możliwie maksymalną szybkością.

Ponad rusztem powstaje płomień dyfuzyjny, w którym spalają się części lotne, wyprodukowany w warstwie koksu tlenek węgla oraz porwane z rusztu drobne cząstki stałe. Płomień ten jest wzbogacony w tlen przez strumień powietrza wtórnego. Ogólny współczynnik nadmiaru powietrza przy którym zachodzi spalanie jest rzędu 1,8, temperatura spalin natomiast dochodzi do 1620°K . Część ciepła od spalin na drodze promieniowania i konwekcji przechodzi do warstwy węgla na ruszcie i bierze udział w jego grzaniu, suszeniu i odgazowaniu oraz wydajnie wspomaga zgazowanie koksu (utlenianie na CO).

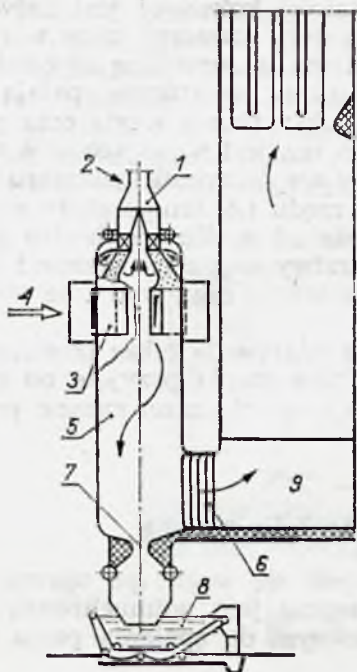
Istotną rolę w procesie wymiany ciepła odgrywają także powierzchnie ścian i sklepienia komory paleniska, które ciepło przyjęte od spalin (głównie w drodze konwekcji) przekazują warstwie na ruszcie przez promieniowanie.

1.1.15. Pyłowe palenisko cyklonowe

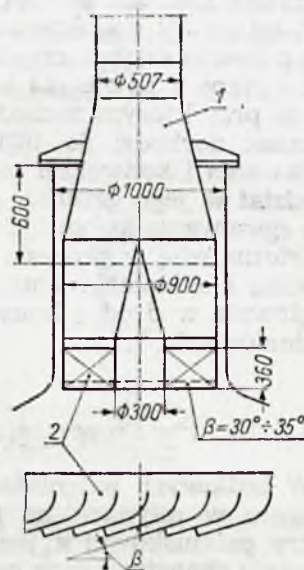
W kotłowych paleniskach pyłowych spala się węgiel po uprzednim zmieleniu w młynach na pył, który następnie jest wdmuchiwany do komory paleniskowej z powietrzem potrzebnym do spalania przez odpowiednio skonstruowane palniki.

Kształt komory paleniskowej, ilość oraz konstrukcja palników decydują o przebiegu spalania. Na rys. 1.30 przedstawiono szkicowo jedno z wielu możliwych rozwiązań, tj. palenisko z cyklonową komorą wstępną. Mieszanka pyłu i powietrza jest doprowadzana do komory cyklonowej od góry przez palnik nadający jej ruch wirowy (rys. 1.31). Powietrze wtórne podawane zgodnie z kierunkiem obrotu mieszanki podtrzymuje ją w tym ruchu. W strefie między palnikiem i odprowadzaniem powietrza wtórnego następuje podgrzewanie i suszenie pyłu. Odbywa się to wskutek wymiany ciepła ze strumieniem gorących spalin zassanych z niżej położonej strefy spalania. Te same spaliny służą do realizacji zapłonu, który następuje tuż przed obszarem mieszania się powietrza wtórnego z pierwotnym strumieniem mieszanki. Natężenie przepływu powietrza pierwotnego jest rzędu 20% całej ilości powietrza niezbędnego do spalania. Stosowane temperatury powietrza pierwotnego i wtórnego są rzędu $520\text{--}720^{\circ}\text{K}$; zależy to przede wszystkim od udziału części lotnych w paliwie, od ilości zawartego w nim popiołu oraz od jego wilgotności. Temperatura płomienia tuż nad otworem żużlowym u spodu komory cyklonowej wynosi $1820\text{--}2070^{\circ}\text{K}$ i musi być w każdym przypadku wyższa od temperatury topliwości żużla, co umożliwia jego odprowadzenie w stanie ciekłym. Ten sposób odprowadzania żużla ułatwia jego separację od spalin, co następuje w wyniku osadzania się go na chłodnych powierzchniach rur przegrodowych umieszczonych w przekroju dzielącym komorę cyklonową od komory dopalania. Osadzony tam żużel spływa następnie przez otwór żużłowy do transportera odprowadzającego go na zewnątrz. Stopień przechwyty żużla w tym palenisku jest rzędu 0,8, stopień wypalenia się paliwa w komorze cyklonowej dochodzi do 0,9 i więcej.

Proces dopalania w komorze za rurami przegrodowymi jest uintensywniony zawirowaniem spalin wywołanym przez przegrodę.



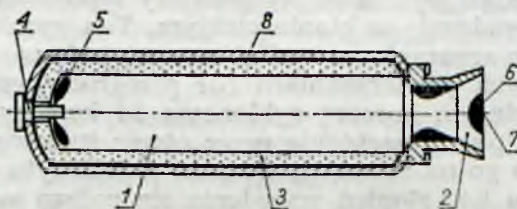
Rys. 1.30. Pyłowe palenisko cyklonowe: 1 — palnik, 2 — odprowadzenie pyłu węglowego, 3 — dysze powietrza wtórnego, 4 — doprowadzenie powietrza wtórnego, 5 — komora spalania, 6 — rury przegrodowe, 7 — otwór żuźlowy, 8 — odprowadzenie żuźła, 9 — komora dopalania



Rys. 1.31. Palnik cyklonowy: 1 — kanał doprowadzający mieszanę pyłu węglowego i powietrza pierwotnego

1.1.16. Silnik rakietowy na stały materiał pędny

Schemat silnika rakietowego na stały materiał pędny przedstawiono na rys. 1.32. Silnik składa się z dwu zasadniczych zespołów: komory spalania, która spełnia równocześnie funkcję zbiornika materiału pędnego oraz dyszy. Między metalowymi ściankami komory a materiałem pędym znajduje się warstwa z elastycznego tworzywa, która przenosi różnicę rozszerzalności metalu i materiału pędnego. W dno komory spa-



Rys. 1.32. Silnik rakietowy na stały materiał pędny: 1 — komora spalania, 2 — dysza, 3 — stały materiał pędny, 4 — zapalnik, 5 — podsypka, 6 — materiał higroskopijny, 7 — przepona, 8 — warstwa materiału elastycznego

lania jest wkręcony zapalnik, który rozpoczyna pracę silnika, zapalając podsypkę (woreczek wypełniony prochem czarnym). Przekrój wylotowy dyszy jest zamknięty przeponą z cienkiej blachy metalowej. Do przepony jest przymocowany woreczek z materiałem higroskopijnym, który chroni wnętrze silnika przed zawilgoceniem. Po zapaleniu podsypki wytwarzające się spaliny podnoszą ciśnienie oraz temperaturę w komorze i inicjują spalanie materiału pędnego. Wtedy pod wpływem ciśnienia następuje rozerwanie przepony i rozpoczyna się wypływ spalin na zewnątrz. Ciśnienie w komorze ustala się w wyniku równowagi między prędkością powstawania spalin i prędkością wypływu.

Stałe materiały pędne dzielą się stosownie do składu i struktury fizycznej na dwie kategorie materiałów jednorodnych i niejednorodnych.

Podstawowymi składnikami materiałów jednorodnych są tworzące koloidalną mieszaninę estry kwasu azotowego: nitrogliceryna i nitroceluloza. Skład ten wywodzi się od stosowanego już od wielu lat w artylerii prochu bezdymnego. Oprócz wymienionych składników jednorodny materiał stały zawiera niewielkie ilości innych substancji. Do nich należą stabilizatory, stosowane w celu zmniejszenia szybkości rozkładu w czasie przechowywania, flegmatyzatory, zmniejszające prędkość palenia oraz substancje stosowane do obniżenia temperatury spalania, zwiększania plastyczności i wytrzymałości ziaren.

Jednorodne materiały pędne ze względu na szereg wad są obecnie wypierane przez materiały niejednorodne. Do wad tych należą: mała trwałość, silna zależność prędkości spalania od ciśnienia, znaczny koszt półproduktów oraz skomplikowany i niebezpieczny wyrób.

Wady te w mniejszym stopniu występują w niejednorodnych materiałach pędnych. Mają one różny skład, ale ich cechą wspólną jest powstawanie na drodze rozprzodzenia cząstek dobrze rozdrobionej substancji utleniającej w podłożu żywicowym, elastomerowym lub podobnym sztucznym tworzywie organicznym.

Struktura tych materiałów jest wyraźnie niejednorodna z lokalnymi obszarami bogatymi lub ubogimi w tlen. Powszechnie spotykanymi utleniaczami w niejednorodnych materiałach pędnych są azotany i nadchlorany.

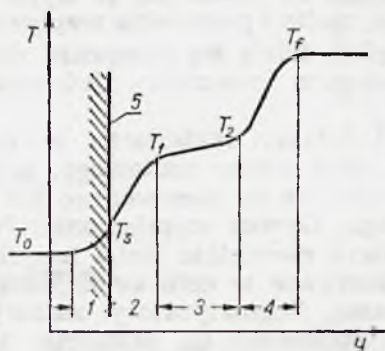
Spalanie stałych materiałów pędnych następuje równoległymi warstwami, dlatego można je traktować jako proces jednowymiarowy.

Charakterystyczny dla tego procesu profil temperatury przedstawiono na rys. 1.33. Wyróżniono tam cztery strefy: rozkładu, syczenia, przygotawczą i płomienia. Model ten jest ogólny i dotyczy obu kategorii materiałów pędnych.

Strefa rozkładu charakteryzuje się tym, że reakcje przebiegają w niej w stanie stałym. Reakcje te inicjuje wzrost temperatury będący następstwem przewodnictwa ciepła z sąsiedniej strefy syczenia. W tej właśnie strefie bezpośrednio przylegającej do powierzchni paliwa, następuje przekształcenie fazy stałej przez topienie i parowanie bądź sublimację; zachodzą tu także niepełne reakcje, w wyniku których wydzielą się ciepło. Strefa przygotowawcza występuje za strefą syczenia. W niej nie wydzielą się ciepło, ale powstają aktywne ośrodki niezbędne dla przebiegu końcowych reakcji. Reakcje końcowe zachodzą w strefie płomienia. Tu wywiązuje się też zasadnicza część ciepła odpowiadająca wartości opałowej materiału pędnego.

Opisany model normalnie przebiegającego procesu spalania bywa często zakłócony dwoma zjawiskami: spalaniem erozyjnym oraz spalaniem niestatecznym.

Spalanie erozyjne jest wynikiem oddziaływania przepływu gazów wzdłuż palącej się powierzchni na prędkość reakcji. Na ogół wzrost prędkości przepływu wywołuje wzrost prędkości spalania. Ma to niekiedy poważny wpływ na przebieg ciśnienia w silniku w czasie oraz na wybór geometrii ładunku przy projektowaniu silnika.



Rys. 1.33. Rozkład temperatur w pobliżu płonącej powierzchni stałego materiału pędnego: 1 — strefa rozkładu, 2 — strefa syczenia, 3 — strefa przygotowawcza, 4 — strefa płomienia, 5 — granica fazy stałej

Spalanie niestateczne objawia się wyskokami ciśnienia, których nie można wyjaśnić w oparciu o teorię spalania statecznego. Wysoki te są następstwem zwiększenia prędkości spalania w wyniku stycznych pulsacji ciśnienia o dużej częstotliwości, które oddziałują na proces spalania przez intensyfikację wymiany ciepła między strefami płomienia i rozkładu. Niestateczność spalania wystąpi wówczas, gdy między poszczególnymi procesami łączącymi pulsacje ciśnienia z prędkością spalania zaistnieją odpowiednie opóźnienia, tak aby początkowe niewielkie zakłócenia były wzmacniane energią uzyskaną ze spalania. Opóźnienia te zależą od własności paliwa oraz od cech konstrukcyjnych silnika. Każdemu zespołowi tych cech odpowiada określona częstotliwość pulsacji ciśnienia w strumieniu spalin, przy której rośnie prędkość spalania. Opanowanie tego zjawiska ma istotne znaczenie dla właściwego wyboru parametrów konstrukcyjnych w czasie projektowania silnika, w którym nie powinno wystąpić spalanie niestateczne.

1.2. Historia i literatura przedmiotu

Umiejętność obchodzenia się z ogniem była jednym z pierwszych wielkich wynalazków człowieka. Używanie ognia stało się kryterium odróżniającym człowieka zaczynającego swój intelektualny rozwój od jego przodków.

Odkrycia archeologiczne umiejscawiają pierwsze zastosowanie ognia na około 600 tysięcy lat przed teraźniejszością, a jego pierwsze sztuczne wytwarzanie na około 30 tysięcy lat. Ogień oraz wytwarzanie ognia odgrywały wybitną rolę we wszystkich wczesnych religiach, na przykład

w mitologii greckiej (mit o Prometeuszu), w rzymskiej religii państwowej czy indoirañskim kulcie Mitry. Na tym gruncie też powstały pierwsze mistyfikujące jego istotę próby odpowiedzi na pytanie: co to jest ogień? „Ogień jest żywym zwierzęciem, które pochłania wszystko czego dopadnie, nasycone zaś umiera wraz z tym co pochłonęło”. Tak brzmi pochodząca z X wieku p.n.e., podana przez kapłanów egipskich prae-definicja procesu spalania.

Pierwsze naukowe rozważania na temat płomienia były przeprowadzone prawdopodobnie przez *Heraklita* (540—480 p.n.e.) i *Empedoklesa* (500—430 p.n.e). Proponowali oni, aby uznać ogień jako jeden z czterech elementów (wraz z powietrzem, wodą i ziemią), które tworzą wszechświat. Ten pogląd został zaakceptowany przez *Arystotelesa* (384—322 p.n.e) i głównie dzięki jego autorytetowi przez wszystkich następnych uczonych aż do epoki Odrodzenia. W tym czasie w wielu dziedzinach nauki spekulacje myślowe zaczęto uzupełniać eksperymentami. Twórcą tej idei był *Galileusz* (1564—1642), ale w przypadku spalania największe zasługi położył *Franciszek Bacon* (1561—1626), który obserwował strukturę płomienia świecy.

Dalsze badania były przeprowadzone przez *Boyla* (1621—1697), *Hooka* (1635—1703) i *Maynowa* (1641—1679). Wyniki tych obserwacji zostały czasowo zaciemnione przez powstanie teorii flogistonu stworzonej przez *Bechera* (1635—1682) oraz skutecznie bronionej i rozpropagowanej przez *Stahla* (1660—1734). Teoria ta była opracowaniem starej alchemicznej idei, że powstanie płomienia jest następstwem wypływu nieważkiej substancji będącej składnikiem paliw, co ujawnia się podczas spalania.

Ale niezależnie od tego, zapoczątkowane w tym czasie analizy chemiczne doprowadziły do odkrycia szeregu pierwiastków i pozwoliły wejść głębiej w istotę reakcji chemicznych. Syntezą wyników tych prac była publikacja *Lavoisiera* (1734—1794): *Reflexions sur le phlogistique* (1777), w której zaprzeczył on istnieniu flogistonu i położył podstawy pod nowoczesną chemię. W końcu XVIII wieku jego poglądy zostały powszechnie zaakceptowane.

Następnego poważnego kroku w zrozumieniu zjawisk spalania dokonali: *Benjamin Thomson Rumford* (1753—1814) i przede wszystkim *Humpry Davy* (1778—1829), który pierwszy zaczął studiować problem wybuchów w kopalniach i skonstruował bezpieczną lampę górniczą. Jego uczeń *Michał Faraday* (1791—1867) również zajmował się spalaniem i stworzył doskonały wzór dla publikacji popularnonaukowych w postaci książki tłumaczonej na wiele języków w tym i na język polski¹⁾, pod tytułem: „The Chemical History of a Candle”.

Jego następcą był *Robert Bunsen* (1811—1899), który jest najlepiej znany z konstrukcji palnika będącego do dziś w użyciu. Bunsen był również pierwszym, który studiował temperatury płomienia i występujący w nim rozkład prędkości przepływu.

Zaprojektowany przez niego kalorymetr stał się ważnym narzędziem ilościowym do określenia ciepła reakcji spalania.

W okresie, który nastąpił po Bunsenie dokonano wielkiego postępu w dyscyplinach naukowych pokrewnych spalaniu. To zwiększyło zrozumienie wielu zjawisk towarzyszących procesom spalania uwidaczniające się w pierwszych nowoczesnych teoriach rozprzestrzeniania się płomienia, które stworzyli *Mallard* (1833—1894) i *Le Chatelier* (1850—1936).

¹⁾ *Michał Faraday: Dzieje świecy. Warszawa 1953. Wiedza Powszechna.*

Ich prace w oparciu o analizę gazodynamiczną kontynuowali, prawie współcześni nam, *Chapman* i *Jouguet*, którzy pierwsi rozróżnili spalanie od detonacji i byli twórcami idei, że obydwie te procesy mogą być opisane za pomocą równań, których rozwiązaniem jest pewna wielkość identyfikowalna z prędkością rozprzestrzeniania się płomienia.

W okresie między wojnami światowymi dziedzina spalania była permanentnie rozwijana przez szereg pracowników nauki w różnych krajach. Powstała też wtedy pewna liczba ośrodków badawczych związanych z uniwersytetami lub instytutami państwowymi, głównie w Anglii, Związku Radzieckim, Niemczech, Francji i Stanach Zjednoczonych.

Jednak większość wykonanych tam prac ma już tylko wartość historyczną, gdyż wyposażenie ówczesnych laboratoriów i technika pracy badawczej były prymitywne w stosunku do obecnego standardu. Nie znano lub nie stosowano jeszcze wtedy spektrografii i chromatografii, precyzyjnej elektrycznej i elektronicznej aparatury pomiarowej maszyn matematycznych oraz będących dziś w powszechnym użyciu wysokiej czystości chemikaliów.

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że większość idei dotyczących nowoczesnej teorii spalania zostało sformułowanych właśnie podczas tego okresu. Przekazano je w sposób systematyczny w szeregu doskonale napisanych rozpraw, z których na szczególne wyróżnienie zasługują książki: *Bonea* i *Townenda* (L. 14) oraz *Josta* (L. 19).

Do tego czasu źródłem inspiracji w badaniach nad spalaniem, poza samą chęcią poznania zjawiska, były potrzeby wynikające z rozwoju konstrukcji silników spalinowych, palenisk kotłowych, pieców hutniczych oraz konieczność walki z pożarami i wybuchami w kopalniach. W końcu drugiej wojny światowej wszedł na widownię nowy czynnik, a mianowicie rozwój turbin spalinowych oraz silników odrzutowych: pulsacyjnego, strumieniowego i przede wszystkim raketowego, stanowiących napęd dla nowoczesnych samolotów wojskowych, pocisków kierowanych i pojazdów kosmicznych.

Wymagania jakie stawia się komorom spalania w tych urządzeniach co do sprawności, obciążenia cieplnego, ciężaru jednostkowego i zakresu pracy przewyższa o rząd lub kilka rzędów wielkości, to, z czym technika spalania miała dotychczas do czynienia. Ten skok jakościowy mógł być dokonany jedynie przy równoczesnym postępie, w technologii, produkcji paliw i utleniaczy oraz jakości materiałów konstrukcyjnych. Musiała być także opanowana właściwa metoda prowadzenia prac rozwojowych nowych konstrukcji oparta o ilościową analizę procesów, przeprowadzaną na podstawie dokładnych i szczegółowych pomiarów oraz wizualizacji.

To wszystko zostało wykonane w stosunkowo szybkim czasie dzięki dużym środkom jakie były do dyspozycji i odpowiedniej organizacji koordynującej wysiłek poszczególnych ośrodków. Wynikiem tego przedsięwzięcia poza sukcesami natury technicznej był zalew publikacji, których już w pierwszym dziesięcioleciu po wojnie ukazało się więcej niż w poprzednich stu latach. Poziom ich jest, jak można się było spodziewać, bardzo nierówny, ale w ten sposób został stworzony szeroki front prac badawczych, które są wciąż pogłębiane i uzupełniane.

Wydane zostało także szereg syntetycznych publikacji książkowych ujmujących dorobek ostatnich lat w różnych dziedzinach teorii i techniki spalania. Są to przede wszystkim książki: *Gaydona* i *Wolfharda* (L. 16), *Spaldinga* (L. 27), *Thringa* (L. 52), *Fristroma* i *Westenberga* (L. 15), *Le-*

wisa i Elbe (L. 21), *Williamsa* (L. 34), *Knorrego* (L. 20), *Chitrina* (L. 18), *Szczetnikowa* (L. 29) oraz *Szczotkina* i *Troszina* (L. 28).

Wielką rolę w rozpowszechnianiu informacji na temat wiedzy o spalaniu odgrywają organizowane co dwa lata Międzynarodowe Sympozja Spalania. Materiały z tych Sympozjów to znaczy referaty i głosy w dyskusji są następnie publikowane (L. 56—66). Systematyczne zapoznanie się z nimi ułatwia orientację w stanie i kierunkach rozwoju teorii spalania.

Temu samemu celowi mogą służyć sporadycznie wydawane przez różne organizacje i instytucje naukowe prace zbiorowe o charakterze monograficznym, a dotyczące jakiegoś wąsko potraktowanego ale aktualnie ważnego problemu (L. 67—78).

Pomocnym także może być przeglądanie specjalistycznych periodyków: rosyjskiego — *Fizyka gorenija i wzrywa i angielskiego — Combustion and Flames*.

1.3. Charakterystyczne cechy i klasyfikacja procesów spalania

Powszechna znajomość wyrażenia — spalanie, wraz z nieokreślonością tego z czym się on kojarzy w umyśle laika bardzo utrudnia wybór optymalnej definicji.

A jest ich prawie tyle ile książek o spalaniu. Oto kilka z nich:

1) spalanie jest to złożony fizyko-chemiczny proces wzajemnego oddziaływania paliwa i utleniacza uzewnętrzniający się wydzielaniem ciepła i światła (L. 23). Autorzy dodają, że spalanie jest możliwe nie tylko w tlenie. Liczne metale palą się na przykład w chlorze, parach siarki itp. Ciepło i światło wydzielają się także w wyniku rozkładu niektórych związków — towarzyszą np. przy wybuchu sprężonego acetyleny;

2) Spalanie jest chemicznym i aerotermodynamicznym procesem zachodzącym w poruszającej się lub nieporuszającej, aktywnej chemicznie, mieszance gazowej (L. 29). Będzie się więc zgodnie z tą definicją uważać za spalanie, przepływ powietrza za silną falą uderzeniową, gdzie cząsteczki azotu i tlenu dysocjują na atomy i tworzą mieszaninę palną, w której proces spalania polega na powtórным łączeniu się atomów w cząsteczki;

3) spalanie — silna egzotermiczna reakcja zachodząca w gazach (L. 32). Ta koncepcja definicji — dodaje autor — wyłącza reakcję jaka zachodzi na przykład na powierzchni węgla, nie wymaga natomiast w procesie ani udziału tlenu ani emisji światła.

Istnieje ogólna tendencja aby definicją spalania objąć możliwie całą klasę zjawisk leżących w polu zainteresowania aerotermodchemii — dyscypliny naukowej stworzonej kilkanaście lat temu, mieszczącej się na pograniczu chemii fizycznej, termodynamiki i dynamiki gazów — i to nawet kosztem pozostawienia na uboczu pewnych klasycznych procesów (np. spalania węgla). Twórcy aerotermodchemii traktują spalanie jako przepływ połączony z reakcją chemiczną, a związane z tym efekty starają się wyjaśnić w pojęciach właściwych dla kinetycznej teorii gazów, kinetyki reakcji chemicznych, termodynamiki procesów nieodwracalnych i dynamiki płynów.

Próby stworzenia ogólnej teorii spalania w oparciu o równania zachowania ilości ruchu, masy i energii oraz równania kinetyki chemicznej, przewodzenia cieplnego i dyfuzji molekularnej zostały uwieńczone

pewnym sukcesem. Przy określonych założeniach, dotyczących przede wszystkim ważności w procesie spalania transportu ciepła lub aktywnych cząstek ze strefy płomienia w kierunku świeżej mieszanki, powstało szereg rozwiązań, z których najambitniejsze zawiera praca *Hirschfeldera i Curtisa* (L. 59).

Otrzymali oni ogólne równanie płomienia laminarnego rozwiązane przy użyciu maszyn cyfrowych. Ich obliczenia zostały w pewnym stopniu potwierdzone wynikami badań eksperymentalnych.

W tym opracowaniu proponuje się następującą definicję spalania:

Spalanie jest egzotermiczną reakcją chemiczną syntezy, zdolną do samoczynnego przemieszczania się w przestrzeni wypełnionej substratami. Wywiązywanie się ciepła i zdolność do propagacji jest więc, w myśl tej definicji, istotną cechą wyróżniającą proces spalania wśród innych „zwykłych” reakcji chemicznych.

Jeśli w przeciwieństwie do spalania w jakiejś części reaktora zostanie zapoczątkowana „zwykła” reakcja to można ją tam doprowadzić do końca, ale nie wystąpi jej rozprzestrzenianie się. W tym znaczeniu „zwykłą” reakcją może być także w pewnych przypadkach reakcja egzotermiczna, co zachodzi np. przy utlenianiu niektórych siarczków metali (podrozd. 1.1.17).

Jednak egzotermiczność reakcji warunkuje zdolność do jej samoczynnego, tzn. bez interwencji z zewnątrz, przemieszczania się. Nie przeszkadza to jednak, że pewne fazy procesu mogą mieć charakter endotermiczny (np. parowanie, sublimacja lub piroliza).

Zwraca się przy tym uwagę, że w proponowanej definicji nie poznaczono żadnych zastrzeżeń co do udziału tlenu w reakcji (choć oczywiście spalanie występuje najczęściej w postaci utleniania), stanu fizycznego składników, ani też konieczności emitowania przez płomień energii promienistej.

Przemieszczanie się reakcji w przestrzeni sugeruje natomiast, że jest ona ograniczona do strefy, która pozostaje mała w porównaniu z wymiarami reaktora. Ta strefa nosi nazwę płomienia, a jej powierzchnia od strony napływających świeżych składników — czołem płomienia.

Przy realizowaniu procesu spalania mogą, ogólnie rzecz biorąc, zaistnieć dwie sytuacje:

1) w reaktorze panują takie warunki, że nie jest potrzebne doprowadzenie z zewnątrz energii do zainicjowania reakcji. Przebieg reakcji jest kontrolowany prędkością doprowadzenia jej składników do reaktora i ewentualnie szybkością tworzenia się w nim mieszanki o właściwym składzie;

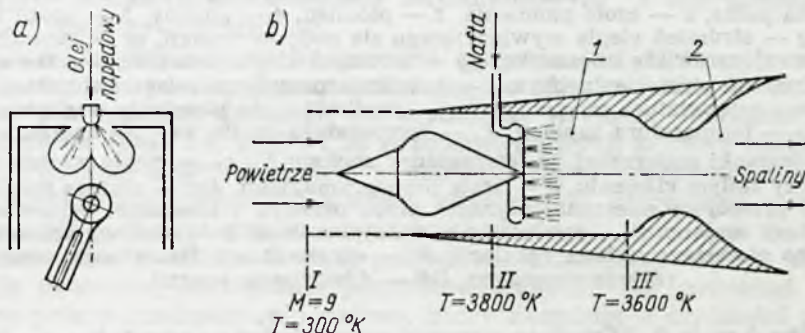
2) w reaktorze panują takie warunki, że do zainicjowania reakcji jest potrzebne doprowadzenie energii z zewnątrz. Z chwilą jednak, gdy reakcja została zapoczątkowana jej dalsze rozprzestrzenianie się zachodzi już samoczynnie wskutek istnienia określonych mechanizmów transportujących energię ze strefy reakcji do świeżej mieszanki przed czołem płomienia. Tak więc prędkość rozprzestrzeniania się płomienia jest kontrolowana przez istnienie sprzężenia zwrotnego między reakcją chemiczną, transportem ciepła i przepływem.

Pierwszy przypadek spalania kontrolowanego przez dopływ składników reakcji do strefy spalania ilustrują szkice na rys. 1.34.

Szkic a) przedstawia spalanie w silniku tłokowym z zapłonem samoczynnym. W tym przypadku powstała w komorze spalania mieszanka

pobiera energię do zainicjowania reakcji ze sprężonego w niej powietrza. Szybkość procesu jest kontrolowana szybkością tworzenia się zdolnej do zapłonu mieszanki.

Na szkicu b) przedstawiono hipersoniczny silnik strumieniowy. Do silnika napływa powietrze z prędkością odpowiadającą liczbie Macha $Ma = 9$. Temperatura powietrza po sprężeniu w dyfuzorze silnika osiąga wartość 3800°K . Wtrysnięta w to powietrze nafta ulega endotermicznemu rozkładowi i tylko bardzo fragmentarycznej reakcji z tlenem tworząc w ten sposób mieszaninę o temperaturze o 200°K niższą od jej temperatury początkowej. Proces egzotermiczny następuje dopiero w dyszy



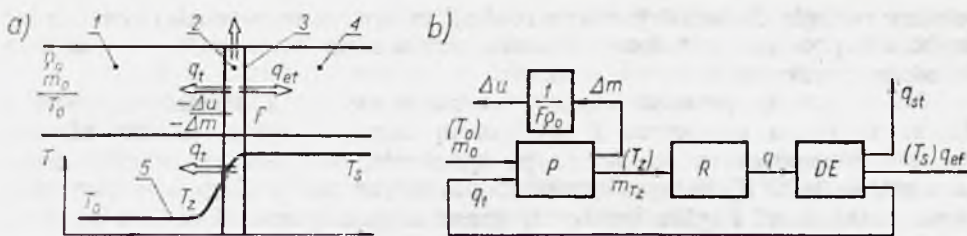
Rys. 1.34. Procesy spalania kontrolowane przez napływ składników reakcji: a — spalinowy silnik o zapłonie kontrolowanym, b — hiperdźwiękowy silnik strumieniowy, I — przekrój przez strumień powietrza napływającego do silnika, II — koniec dyfuzora, początek komory spalania, III — koniec komory spalania, początek dyszy: 1 — proces endotermiczny, 2 — proces egzotermiczny

podczas rozprężenia, które obniżając temperaturę mieszanki umożliwia reakcję syntezy. Dopiero wskutek tego efektu spaliny uzyskują wyższą prędkość na wylocie z dyszy niż miało ją wchodzące do silnika powietrze. W ten sposób otrzymuje się ciąg, który może być wykorzystany na przykład do napędu pocisku.

Proces zachodzący w dyszy kontroluje szybkość rozprężania, to jest szybkość spadku temperatury lub, po przekroczeniu pewnej granicy, kinetyka reakcji chemicznej.

Drugi przypadek spalania, w którym prędkość rozprzestrzeniania się płomienia jest kontrolowana ilością ciepła dostarczonego ze strefy reakcji do mieszanki w celu jej ogrzania do temperatury zapłonu przedstawiają szkice na rys. 1.35. Ogólny model procesu przedstawia szkic a). Przewodem płynie mieszanka, której temperatura jest niższa od temperatury zapłonu. Różnicę tę wyrównuje ciepło napływające ze strefy reakcji wskutek istnienia w niej odpowiednio skierowanego gradientu temperatury. Jeśli prędkość rozprzestrzeniania się płomienia jest różna od prędkości przepływu, wtedy płomień przemieszcza się w przewodzie.

Na szkicu b) ten sam model został przedstawiony w postaci schematu otwartego układu regulacji. Na tym schemacie prostokąty oznaczają procesy, strzałki — sygnały (czyli wielkości decydujące o przebiegu procesu) linie natomiast, powiązania między procesami. Natężenie przepływu mieszanki (m_{Tz}), która osiąga temperaturę zapłonu reguluje strumień ciepłny q , przetransportowany ze strefy reakcji. Wartość Δm oznacza różnicę między natężeniem przepływu mieszanki, a możliwością jej konsumpcji w reakcji. Płomień jest ustabilizowany względem prze-



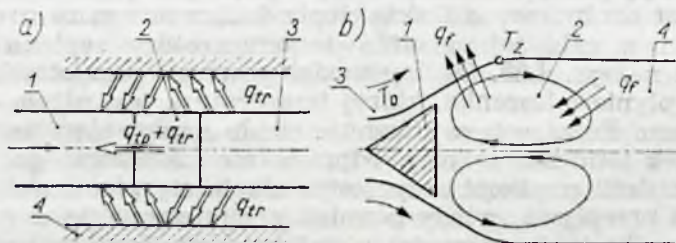
Rys. 1.35. Proces spalania kontrolowany ilością ciepła dostarczonego ze strefy reakcji do mieszanki: a — fizyczny model rozprzestrzeniania się płomienia, 1 — mieszanka palna, 2 — czoło płomienia, 3 — spaliny, 4 — ściana reaktora, 5 — profil temperatury, q — strumień ciepła wywołującego się podczas reakcji, q_t — strumień ciepła ogrzewający świeżą mieszankę, q_{ef} — strumień ciepła unoszonego przez spaliny, q_{st} — strumień strat ciepłych, m_0 — natężenie przepływu mieszanki palnej, T_0 — początkowa temperatura mieszanki, Δu — prędkość czoła płomienia względem przewodu, T_z — temperatura zapłonu, T_s — temperatura spalin, m_{T_z} — natężenie przepływu mieszanki podgrzanej do temperatury zapłonu, c_p — ciepło właściwe mieszanki przy stałym ciśnieniu, k — stała proporcjonalności, Δm — różnica między natężeniem przepływu mieszanki płynącej przez przewód i mieszanki ogrzewanej do temperatury zapłonu, F — powierzchnia czoła płomienia, b — blokowy schemat spalania jako otwartego układu regulacji, P — ogrzewanie i dystrybucja masy, R — reakcja chemiczna, DE — dystrybucja energii

wodu gdy $\Delta m = 0$. Można to uzyskać odpowiednio zmieniając m_0 lub q_t . Oddziaływanie jednak na q_t jest możliwe tylko w pewnych okolicznościach to znaczy wtedy, gdy w ogóle istnieje możliwość zmiany rozdziału energii cieplnej (DE) wywołanej w czasie reakcji chemicznej. W przypadku ogólnym ciepło reakcji dzieli się na trzy strumienie:

- 1) strumień ogrzewający świeżą mieszankę (q_t);
- 2) strumień odprowadzony ze strefy reakcji na zewnątrz reaktora (q_{st});
- 3) strumień odprowadzony ze spalinami (q_{ef}).

Jedną z metod oddziaływania na rozdział energii cieplnej uzyskanej podczas reakcji jest zmniejszenie q_{st} (przez lepszą izolację strefy reakcji), co automatycznie wpływa na wzrost q_t i q_{ef} .

Istnieje kilka sposobów przekazywania ciepła ze strefy reakcji do świeżej mieszanki. Może się to odbywać, jak pokazano na rys. 1.35a,



Rys. 1.36. Mechanizmy przenoszenia się ciepła ze strefy reakcji w kierunku świeżej mieszanki a — wymiana przez przewodzenie i promieniowanie: 1 — mieszanka palna, 2 — płomień, 3 — spaliny, 4 — ściana reaktora pośrednicząca w wymianie ciepła przez promieniowanie, q_{tr} — ciepło promieniowania, q_{tp} — ciepło przewodzenia, b — wymiana przez konwekcję wymuszoną z wykorzystaniem wiru cyrkulacyjnego; 1 — statecznik płomienia (ciało o kształcie nieopływowym), 2 — wir cyrkulacyjny, 3 — mieszanka palna, 4 — spaliny, T_0 — temperatura mieszanki, T_z — temperatura zapłonu

bezpośrednio przez czoło płomienia, za pomocą przewodzenia lub, jak to podają szkice na rys. 1.36, przy współdziale promieniowania i konwekcji wymuszonej.

W pewnych szczególnych przypadkach istotne znaczenie w tym procesie ma przekazywanie energii mechanicznej. I wtedy istnieje szereg możliwości poczynając od silników tłokowego (rys. 1.3 i 1.19) i strumieniowego (rys. 1.17 i 1.34), a kończąc na zwykłej fali detonacyjnej. W każdym z tych przypadków energia spalin jest wykorzystana do wstępnego sprężenia mieszanki palnej i przez to do podniesienia jej temperatury, nawet, jak to się dzieje w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym, hipersonicznym silniku strumieniowym i fali detonacyjnej, powyżej temperatury zapłonu.

Charakterystyczną cechą procesu spalania jest złożoność występujących w nim zjawisk. Poszczególne jego stadia zachodzą w kolejnych, łatwiej lub trudniej dających się wydzielić, strefach. Wyraźnie jest to widoczne na rys. 1.17, 1.29 i 1.30 przedstawiających komorę spalania silnika strumieniowego, palenisko z mechanicznym rusztem taśmowym oraz palenisko z cyklonową komorą wstępną. W pierwszym przypadku do spalania jest użyta nafta, w pozostałych węgiel, różniący się jedynie stopniem rozdrobnienia. Rodzaj paliwa ma zasadniczy wpływ na organizację procesów, szczególnie przygotowawczych. Na przykład bardzo istotny proces rozdrobnienia paliwa, który decyduje o szybkości przebiegu zgazowania węgla i odparowania paliwa ciekłego, w przypadku węgla jest bardzo złożony i musi być realizowany poza komorą. W przypadku paliwa ciekłego sprawę tę załatwia się przez umieszczenie w komorze jednego lub kilku wtryskiwaczy. Właściwa organizacja procesu w poszczególnych strefach polega na pełnej kontroli jego przebiegu, co uzyskuje się przez odpowiednio dobrane schematy przepływu masy i ciepła.

O przebiegu procesu spalania jako całości decyduje szereg czynników, które stanowią kryteria do klasyfikowania go. Są to:

1) charakter przepływu przez strefę reakcji, to jest — czy przepływ jest laminarny, czy turbulentny. Ten czynnik ma zasadniczy wpływ na procesy wymiany ciepła, masy i pędu;

2) stopień wymieszania utleniacza z paliwem na wejściu do strefy reakcji. Przyjmuje się dwa ekstremalne przypadki modelowe:

- gdy paliwo i utleniacz są wstępnie wymieszane oraz,
- gdy mieszanie zachodzi równocześnie z reakcją.

W pierwszym przypadku, o szybkości przebiegu reakcji decyduje jej kinetyka i dlatego ten typ spalania nazywa się kinetycznym. W drugim przypadku, o szybkości przebiegu procesu decyduje szybkość tworzenia się mieszanki (na drodze dyfuzji) zdolnej do reakcji (który to proces jest znacznie wolniejszy od procesu kinetycznego) i dlatego ten drugi rodzaj spalania nazywa się dyfuzyjnym;

3) stan fizyczny składników reakcji. Może on się wyrażać trzema przypadkami:

a) paliwo i utleniacz znajdują się w stanie gazowym — ten typ spalania nazywa się homogenicznym;

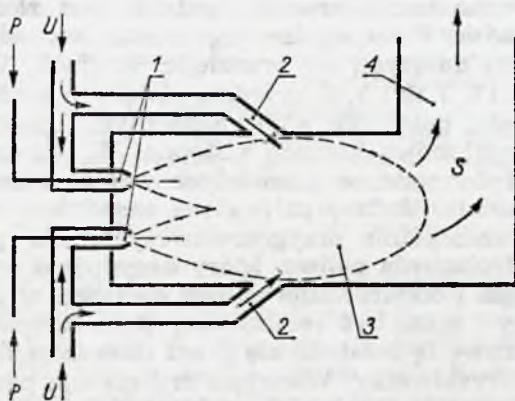
b) paliwo i utleniacz znajdują się w różnych początkowych stanach fizycznych, np. paliwo w stanie ciekłym lub stałym, a utleniacz gazowym — ten typ spalania nazywa się heterogenicznym;

c) paliwo i utleniacz stanowią wstępnie przygotowaną mieszaninę mniej lub więcej jednorodną i znajdują się w stanie skondensowanym

(stałym lub ciekłym). Przykładem może być stały materiał pędny stosowany w silnikach rakietowych (rys. 1.32).

W podobny sposób i według podobnych kryteriów jak procesy spalania, mogą być sklasyfikowane urządzenia, w których ten proces zachodzi, czyli komory spalania i paleniska. Między komorą i paleniskiem nie ma głębszej różnicy, a używanie tych terminów ma swe uzasadnienie w tradycyjnych powiązaniach z dwoma niezależnie rozwijającymi się do pewnego czasu nurtami techniki spalania, inspirowanymi z jednej strony przez rozwój kotłów parowych, z drugiej zaś — silników spalinowych.

Ogólny schemat urządzenia do realizacji procesu spalania przedstawiono na rys. 1.37.



Rys. 1.37. Schemat komory spalania: 1 — palniki, 2 — doprowadzenie utleniacza wtórnego, 3 — płomień, 4 — przetwornik energii spalin, P — paliwo, U — utleniacz, S — spaliny

Urządzenie składa się z dwu zasadniczych elementów: jednego lub kilku palników oraz komory, w której jest usytuowany płomień.

Utleniacz jest doprowadzany do komory przeważnie w kilku etapach, najczęściej w dwu.

Organizacja procesu zależy przede wszystkim od rodzaju paliwa, wymaganej intensywności spalania, końcowej temperatury spalin oraz ich przeznaczenia. Zadania jakie mają do spełnienia spaliny dadzą się zgrupować następująco:

1) wykonanie pracy mechanicznej (tłokowe silniki spalinowe; turbiny spalinowe oraz silniki odrzutowe);

2) ogrzewanie. Mogą w tym wystąpić dwa przypadki:

— ogrzewanie przeponowe, gdy spaliny nie ingerują w procesie, poza doprowadzeniem ciepła (kocioł parowy);

— ogrzewanie bezprzeponowe, gdy spaliny biorą udział w procesie technologicznym (ochrona wsadu w piecu kuźniczym przed utlenianiem, udział w świeżeniu surówki w piecu martenowskim, palnik do cięcia metali).

Zgodny z przeznaczeniem przebieg procesu spalania uzyskuje się przez nadanie odpowiedniej geometrii poszczególnym strefom komory oraz przez właściwą organizację przepływu paliwa i utleniacza.

Zadaniem palników jest wytwarzanie mieszanki paliwa i utleniacza o kontrolowanym składzie i stopniu wymieszania.

W zależności od stopnia wymieszania rozróżnia się podobnie jak płomienie — palniki dyfuzyjne i kinetyczne. Ich konstrukcja zależy przede wszystkim od rodzaju paliwa, charakteru pracy oraz usytuowania. Mogą one stanowić część integralną komory spalania bez możliwości demontażu, lub tak być zaprojektowane, aby demontaż był łatwy do realizacji. W tym rozumieniu palnikiem jest cała przednia część płomienicy komory spalania silnika turbinowego (rys. 1.16) oraz ruszt (z leżącym na nim węglem i przepływającym przezeń powietrzem) w palenisku (rys. 1.29).

1.4. Podstawowe charakterystyki komór spalania

W wieloletniej praktyce inżynierskiej ustalono szereg wielkości, które służą z jednej strony do oceny i porównywania ze sobą komór spalania, z drugiej zaś ułatwiają ustalenie założeń konstrukcyjnych przy projektowaniu.

Przyjęcie tych wielkości charakteryzujących komorę spalania było spowodowane określonymi wymaganiami stawianymi komorom.

Szczególnie ważnym wymaganiem są małe gabaryty. Mogą one mieć poważny wpływ na koszty budowy, a często (jak to się dzieje w silnikach odrzutowych) decydują o osiągnięciach urządzenia, którego częścią składową jest komora. Wymiary komory wpływają na efektywność wykorzystania w niej miejsca oraz określają warunki organizacji procesu spalania.

Wielkością, która charakteryzuje proces pod tym względem jest obciążenie cieplne objętości komory spalania (zwane często intensywnością spalania)

$$q_v = \frac{\xi W_u B}{V_k p_0} \quad [1]$$

gdzie: ξ — współczynnik wywiązywania się ciepła;

B — zużycie paliwa;

V_k — objętość komory spalania;

p_0 — ciśnienie bezwzględne na początku komory spalania;

W_u — wartość opałowa paliwa.

Wymaganie budowy komór spalania o małych wymiarach jest więc równoznaczne z zastosowaniem dużego obciążenia cieplnego objętości komory.

Wartość obciążenia cieplnego zależy od temperatury spalania (to znaczy od współczynnika nadmiaru utleniacza) oraz od natężenia przepływu przez komorę. Duże obciążenie cieplne jest więc równoznaczne z wysoką temperaturą i znaczną prędkością przepływu. Wymaga to zastosowania w konstrukcji komory właściwych materiałów oraz odpowiednich urządzeń do ustateczniania płomienia.

Spotykane obecnie wartości obciążeń zostały przedstawione w tablicy 1.1.

Poza obciążeniem cieplnym objętości podobne znaczenie przy ocenie komór spalania ma obciążenie cieplne pola powierzchni przekroju poprzecznego. Wielkość ta zależy od wartości opałowej mieszanki palnej oraz strumienia masy przepływającej przez komorę (natężenie przepływu przypadające na jednostkę pola powierzchni przekroju poprzecznego).

Rodzaj komory spalania	$q_v 10^{-6}$ kW/m ³ N/m ²
Paleniska kotłowe	
a) paleniska warstwowe z mechanicznymi rusztami taśmowymi	25–35
b) pyłowe paleniska komorowe ¹⁾	15–25
c) paleniska na olej opałowy i gaz ziemny	30–35
d) pyłowe paleniska cyklonowe	70–600
Komory spalania turbin spalinowych	3000–6000
Komory spalania silników strumieniowych	3500–10000
Komory spalania silników raketowych na ciekły materiał pędny	16000–40000

¹⁾ Pyłowe palenisko komorowe: palenisko o komorze w kształcie zbliżonym do prostopadłościanu z wbudowanymi w ścianach palnikami pyłowymi.

go) i może być wyrażone zależnością

$$q_F = \frac{\xi W_u B}{F} \quad [1a]$$

gdzie: F — pole powierzchni przekroju poprzecznego komory.

Wybór przy projektowaniu komory dużego q_F utrudnia realizację statecznego spalania ze względu na zwiększone prędkości przepływu oraz zwiększenie strat ciśnienia spowodowanych oporami aeromechanicznymi i doprowadzeniem ciepła. Duże q_F umożliwia zmniejszenie wymiarów poprzecznych komory, które w wielu przypadkach bezpośrednio decydują o ciężarze, koszcie i właściwościach użytkowych całej konstrukcji (w silnikach odrzutowych na przykład decydują o oporze aerodynamicznym silnika).

Przykładowe wartości q_F podano w tablicy 1.2. Zwraca się przy tym uwagę, że wielkość q_F może służyć do porównywania ze sobą komór tylko o tym samym ciśnieniu roboczym.

Następną, nie mniej ważną, wielkością charakteryzującą proces spalania w komorze jest współczynnik wywiązywania się ciepła

$$\xi = \frac{Q_w}{W_u} = 1 - \sum q_{sw} \quad [1.2]$$

gdzie: Q_w — ciepło wywiązane z jednostki masy paliwa;

$\sum q_{sw}$ — suma strat wewnętrznych (strata popielnikowa, strata niezupełnego spalania itp.) przypadająca na jednostkę masy paliwa.

Wszystkie straty ciepłe w procesie spalania uwzględnia sprawność termiczna komory

$$\eta_k = 1 - \sum q_{sw} - \sum q_{sT} = \xi - \sum q_{sT} \quad [1.3]$$

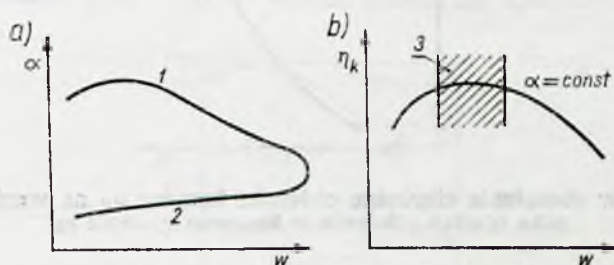
Tablica 1.2

OBCIĄŻENIE CIEPLNE POŁA POWIERZCHNI PRZEKROJU POPRZECZNEGO KOMÓR SPALANIA

Rodzaj komory spalania	$q_F 10^{-3}$ kW/m ²
Paleniska kotłowe	
a) palenisko warstwowe	1,4–2,1
b) pyłowe palenisko komorowe	
— kocioł o wydajności pary do 100 kg/s	2,3–3,5
— kocioł o wydajności pary do 275 kg/s	3,5–4,6
c) pyłowe palenisko cyklonowe wg rys. 1.3	14,0–16,0
Komora spalania silnika pulsacyjnego	15,0–25,0

gdzie: Σq_{sT} — suma strat spowodowana wymianą ciepła z otoczeniem (strata ciepła, na chłodzenie komory, ciepło odprowadzone z żużłem itp.) przypadająca na jednostkę masy paliwa.

Wymagania dużego obciążenia cieplnego komory oraz jej wysokiej sprawności termicznej są na ogół przeciwstawne. Z tego powodu formuluje się je zwykle następująco: komora powinna pracować statecznie w szerokim zakresie obciążeń (co jest niezbędne ze względów eksploatacyjnych), w określonym natomiast i znacznie węższym zakresie powinna pracować z możliwie najwyższą sprawnością. Ten zawężony zakres powinien oczywiście odpowiadać najczęściej spotykanym warunkom eksploatacji komory. Stąd wynika ważność dwu charakterystyk szkicowo przedstawionych na rys. 1.38.



Rys. 1.38. Charakterystyki komory spalania: a — zakres statecznej pracy, b — sprawność termiczna komory η_k w zależności od prędkości przepływu przez komorę. α — współczynnik nadmiaru utleniacza, 1 — uboga granica zgaśnięcia, 2 — bogata granica zgaśnięcia, 3 — obszar eksploatacji

Szkic a) przedstawia pole statecznej pracy komory. Wynika z niego, że przy danej prędkości przepływu przez komorę występuje określony zakres współczynników nadmiaru utleniacza, przy których komora pracuje statecznie. Zakres ten zawęża się w miarę zwiększania prędkości. Górną linię wykresu 1 nazywa się ubogą granicą zgaśnięcia, dolną — bogatą granicą zgaśnięcia. Terminy te odpowiadają pojęciom bogatej¹⁾ i ubogiej mieszanki. Szkic b) przedstawia zależność sprawności komory od prędkości przepływu przy stałym współczynniku nadmiaru powietrza. Wynika z niego istnienie odcinka o mniej więcej stałej (i wysokiej) sprawności, który odpowiada eksploatacyjnemu zakresowi pracy komory.

Zaprojektowanie komory w taki sposób aby „szczyt sprawności” pokrywał się z jej eksploatacyjnym zakresem pracy wymaga szczególowej znajomości czynników wpływających na przebieg charakterystyki spalania. Zasadniczą rolę, na ogół w tym problemie, odgrywa właściwe usytuowanie miejsc doprowadzających powietrze wtórne oraz kierunek i głębokość jego penetracji. Trzecią wielkością charakteryzującą komorę spalania jest współczynnik strat aeromechanicznych.

$$\psi_k = \frac{\Delta p}{\frac{\rho w^2}{2}} \quad [1.4]$$

gdzie: Δp — spadek ciśnienia całkowitego w komorze spalania;
 ρ — gęstość czynnika w wejściowym przekroju komory;
 w — prędkość czynnika w wejściowym przekroju komory.

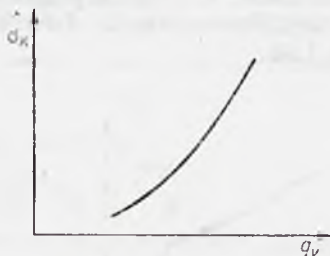
¹⁾ Mieszanką bogatą nazywa się taką mieszankę, która zawiera duży odsetek paliwa.

Odpowiednikiem współczynnika strat aeromechanicznych jest współczynnik spadku ciśnienia

$$\sigma_k = \frac{p_2^*}{p_1^*} \quad [1.5]$$

gdzie: p_1^* i p_2^* — ciśnienia całkowite na początku i końcu komory spalania.

Na wartość tych współczynników wpływają straty ciśnienia całkowitego w komorze spowodowane oporem mechanicznym oraz spadkiem ciśnienia wskutek doprowadzenia ciepła.



Rys. 1.39. Wpływ obciążenia cieplnego objętości komory q_v na wartość współczynnika spadku ciśnienia w komorze spalania σ_k

Zachodzi więc ścisła zależność między obciążeniem cieplnym komory, a współczynnikiem spadku ciśnienia (rys. 1.39). Podobna, choć nie tak oczywista relacja występuje między współczynnikiem wywołującym się ciepła a stratami aeromechanicznymi. Bierze się to stąd, że z reguły wzrost sprawności jest okupiony wstawieniem do komory jakichś elementów (najczęściej ustateczniających płomień), które stwarzają dodatkowy opór przepływu.

Wymaganie, aby straty aeromechaniczne w komorze były małe jest z jednej strony inspirowane przez chęć obniżenia zapotrzebowania mocy zużytej na napęd sprężarek lub dmuchaw tłoczących powietrze do komory, z drugiej zaś poważnym wpływem (w pewnych przypadkach) tych strat na osiągi urządzenia, któremu służy komora spalania. Dla przykładu w tablicy 1.3 przedstawiono wpływ wartości współczynników σ_k i ψ_k

Tablica 1.3
WPŁYW WSPÓŁCZYNNIKÓW: STRAT AEROMECHANICZNYCH ψ_k I SPADKU CIŚNIENIA σ_k NA CIĄG JEDNOSTKOWY R_j I JEDNOSTKOWE ZUŻYCIE PALIWA b_R SILNIKA ODRZUTOWEGO

ψ_k		0	11,5	23	46
σ_k		1	0,95	0,90	0,80
R	daN·s/kg	1	3500	3390	3110
b_R	mg/N·s	1	28,6	29,5	32,2

na ciąg jednostkowy R_j (ciąg przypadający na 1 kg czynnika roboczego przepływającego przez silnik w czasie 1 sekundy) i jednostkowe zużycie paliwa b_R (zużycie przypadające na 1 MN ciągu i sekundę) silnika odrzutowego.

Inną ważną wielkością charakteryzującą komorę spalania jest współczynnik nadmiaru powietrza (lub bardziej ogólnie: współczynnik nadmiaru utleniacza)

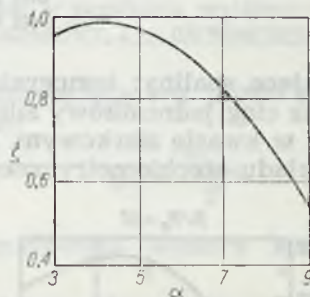
$$\alpha = \frac{L_r}{L_t} \quad [1.6]$$

gdzie: L_t — teoretyczne zapotrzebowanie utleniacza przypadające na jednostkę masy paliwa

L_r — rzeczywista ilość utleniacza przypadająca na jednostkę masy paliwa.

Wartość współczynnika nadmiaru powietrza określa wysokość temperatury spalin. Z tym wiąże się jego decydujący wpływ na organizację procesu spalania, a przez to i na konstrukcję komory.

Wysokie współczynniki nadmiaru powietrza odpowiadają niskim temperaturom płomienia, a te z kolei źle wpływają na sprawność procesu. Stąd bierze się konieczność stosowania, na przykład w komorach spalania silników turbinowych, podziału płomienicy na dwie strefy: płomienia i mieszania (rys. 1.16). W strefie płomienia spalanie zachodzi przy



Rys. 1.40. Typowa zależność współczynnika wywiązywania się ξ od współczynnika nadmiaru α dla komory spalania silnika turbinowo-odrzutowego

współczynnikowi nadmiaru powietrza bliskim $\alpha = 1$, co odpowiada wysokiej temperaturze i gwarantuje sprawny przebieg procesu. Obniżenie temperatury do granic wymaganych założeniami następuje przez wymieszanie z powietrzem wtórnym w strefie mieszania. Ten zabieg nie jest oczywiście potrzebny w przypadku komór pracujących przy niskich współczynnikach nadmiaru powietrza (np. komory silnika strumieniowego rys. 1.17).

Jeżeli z założenia chodzi o uzyskanie możliwie maksymalnej temperatury, to współczynnik nadmiaru będzie zależał od stopnia wymieszania paliwa z utleniaczem, na co z kolei wpływa ich stan fizyczny (np. ilość części lotnych w węglu kamiennym) oraz sama procedura mieszania. Minimalne wartości współczynników nadmiaru powietrza dla niektórych typów komór podano w tablicy 1.4.

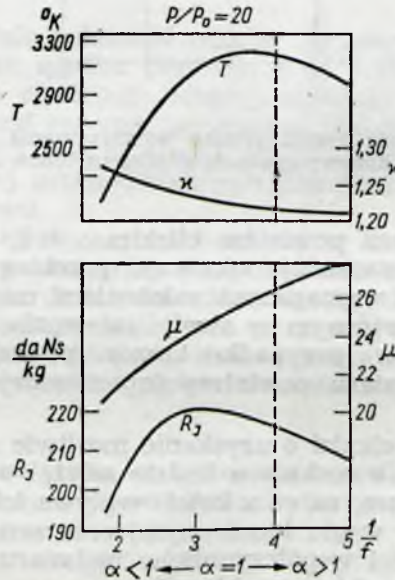
W przypadku, gdy istnieje możliwość uzyskania mieszanki jednorodnej (jak np. w tłokowych silnikach gaźnikowych — rys. 1.3 lub silnikach rakietowych — rys. 1.27 i 1.32) optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza wynika wyłącznie z warunku na maksymalne osiągi urządzenia, któremu ma służyć komora (maksymalna temperatura spalin, maksymalny ciąg jednostkowy, lub minimalne zużycie paliwa). Na rys. 1.41 przedstawiono wpływ stosunku masowych natężeń przepływu utleniacza m_u i paliwa B

$$\frac{m_u}{B} = \frac{1}{f} = \alpha L_t \quad [1.7]$$

MINIMALNE WARTOŚCI WSPÓLCZYNNIKÓW NADMIARU POWIETRZA DLA NIEKTÓRYCH TYPOW KOMOR SPALANIA

Typ komory spalania	Paliwo	α
Kocioł parowy:		
pyłowe palenisko cyklonowe	Węgiel kamienny	1,03
pyłowe palenisko komorowe	Węgiel kamienny	1,25
pyłowe palenisko komorowe	Mazut	1,20
pyłowe palenisko komorowe	Gaz wielkopiecowy	1,15
palenisko warstwowe	Węgiel kamienny	1,4
palenisko warstwowe	Torf, drewno	1,3
Silnik tłokowy o zapłonie samoczynnym:		
komora z wtryskiem bezpośrednim	olej napędowy	1,4
komora wirowa	olej napędowy	1,3
komora wstępna	olej napędowy	1,1

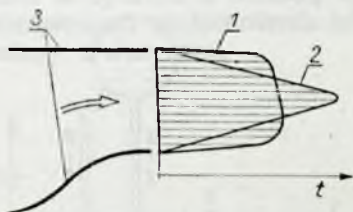
na wielkości charakteryzujące spaliny: temperaturę T , masę molową μ , wykładnik izentropy κ oraz ciąg jednostkowy silnika raketowego R_J , powstałe ze spalania aniliny w kwasie siarkowym. Maksimum temperatury uzyskuje się w pobliżu składu stechiometrycznego po stronie mieszanki



Rys. 1.41. Wpływ ciężarowego stosunku utleniacza (kwasu azotowego) do paliwa (aniliny) na wielkości charakteryzujące spaliny: T — temperatura, κ — wykładnik izentropy, μ — ciężar drobinowy, R_J — ciąg jednostkowy, p/p_0 — stosunek ciśnień w komorze spalania i otoczeniu

bogatej ($\alpha < 1$), maksimum ciągu jednostkowego — przy mieszance jeszcze bogatszej. To przesunięcie szczytów T i R_J tłumaczy się odpowiednią zależnością wykładnika izentropy oraz ciężaru molowego spalin od składu mieszanki palnej oraz ich oddziaływaniem na ciąg jednostkowy. Przesunięcie natomiast maksimum temperatury w stronę $\alpha < 1$ wynika z wpływu dysocjacji, która silniej interweniuje w mieszkach uboższych.

Następne wymaganie, które stawia się większości komór spalania dotyczy określonego pola temperatur. Najczęściej, jak na przykład w komorze turbiny spalinowej, idzie o właściwy, istotny ze względu na wytrzymałość łopatek turbiny profil temperatur w strumieniu spalin na wyjściu z komory (rys. 1.42).



Rys. 1.42. Profile temperatur w przekroju wyjściowym z komory spalania turbiny spalinowej: 1 — właściwy, 2 — niewłaściwy, 3 — ścianki komory

Wielkością charakteryzującą ten profil jest stosunek temperatury maksymalnej do średniej

$$\varphi_T = \frac{T_{max}}{T} \quad [1.8]$$

W omawianym przypadku komory spalania turbiny spalinowej $\varphi_T \leq 1,1$.

Regulacja profilu temperatury polega na właściwym doborze wielkości, kształtu i rozmieszczenia otworów w płomienicy doprowadzających powietrze wtórne do strefy mieszania.

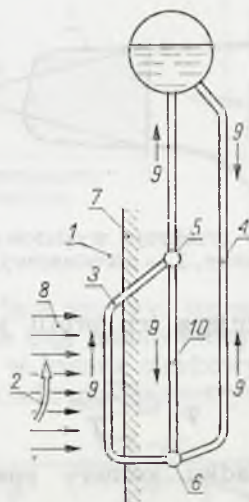
W paleniskach kotłowych problem temperatury spalin opuszczających komorę spalania (dotyczy to palenisk pyłowych) wiąże się ze sposobem odprowadzania żużla.

W przypadku odprowadzania żużla w stanie stałym temperatura spalin nie może przekraczać temperatury topliwości jego najłatwiej topiących się składników, to jest około 1220°K . W przeciwnym razie żużel osadzać się będzie na rurach przegrzewaczy pary i podgrzewaczy wody tworząc narosty zmniejszające prześwity i obniżające współczynniki przejmowania ciepła. Aby temu zapobiec należy, dążyć do skrócenia i zbliżenia strefy spalania pyłu możliwie do wylotu palników oraz intensywnie chłodzić spaliny odpowiednio rozmieszczonymi ekranami (rys. 1.43). Jeśli strefa spalania jest zbyt rozciągnięta i oddalona od palników ku górze wtedy chłodzenie jest mało intensywne i spaliny opuszczające palenisko mogą mieć ze wspomnianymi już konsekwencjami temperaturę wyższą od punktu topliwości żużla.

W przypadku odprowadzenia żużla w stanie ciekłym temperatura spalin powinna być wyższa od temperatury topliwości jego najtrudniej topliwych składników. Unoszone wtedy przez spaliny krople stopionego żużla zostają przechwytywane przez powierzchnie rur przegrodowych (rys. 1.30), na których osadzają się i następnie spływają do komory żużlowej.

Stopień przechwyty żużla przez komorę paleniskową jest jedną z wielkości charakteryzujących ją. Z danych tablicy 1.5 można wnosić, że komory z ciekłym odprowadzeniem żużla znacznie przewyższają pod tym względem komory z odprowadzeniem żużla w stanie stałym.

Ostatnią z najważniejszych wielkości charakteryzujących proces spalania jest stopień zadymienia spalin. Dymienie występuje niemal we wszystkich urządzeniach, w których zachodzi spalanie zaczynając od palenisk kotłowych, a kończąc na silnikach rakietowych. Oczywiście w każdym przypadku inne są przyczyny szkodliwości tego zjawiska



Rys. 1.43. Układ parownika: 1 — komora paleniska, 2 — kierunek przepływu spalin, 3 — ekrany, 4 — rury opadowe, 5 — kolektor górny, 6 — kolektor dolny, 7 — obmu-rze, 8 — przepływ ciepła ze spalin do wody w ekranach, 9 — kierunek przepływu wody w układzie parownika, 10 — rury cyrkulacyjne

Tablica 1.5

WSPÓŁCZYNNIKI PRZECHWYTU ZUZŁA

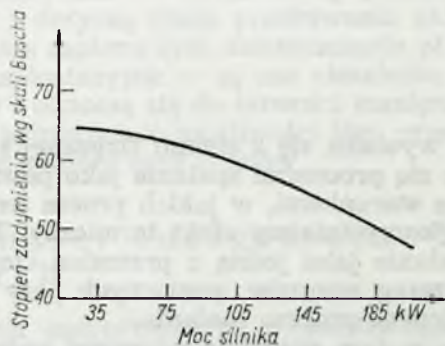
Typ paleniska	Wartość współczynnika
Paleniska pyłowe z odprowadzeniem żużla w stanie stałym	0,10—0,15
Paleniska pyłowe z odprowadzeniem żużla w stanie ciekłym	
— paleniska komorowe	0,30—0,50
— paleniska cyklonowe	0,70—0,90

i w związku z tym inne powody jego zwalczania. Ogólną przyczyną zadymienia spalin jest obecność w nich produktów niezupełnego spalania, a przede wszystkim sadzy, która nadaje dymom ciemne zabarwienie.

Szczególnie nieprzyjemny i groźny dla otoczenia jest dym produkowany przez spalinowe silniki tłokowe o zapłonie samoczynnym. Trudne warunki tworzenia mieszanki w tym silniku (rys. 1.20) powodują występowanie w jego komorze spalania obszarów przebogaconych, nawet przy stosowaniu średniego współczynnika nadmiaru powietrza; jest on dużo większy od jedności. Powstałe w tych obszarach spaliny, jako wytwór procesu niezupełnego spalania, zawierają wiele składników, które nie uległy reakcji i z których część, jak na przykład tlenek węgla i akroleina, działa toksycznie na żywe organizmy. Inne na przykład sadze osiadając na ścianach komory spalania, grzybkach i trzonkach zaworów oraz denku tłoka powodują zakleszczanie pierścieni tłokowych w ich rowkach, zawi-

sanie zaworów i zaślepianie otworów wtryskowych wtryskiwaczy, zmniejszając w ten sposób okres między naprawami.

Zjawisko to powoduje zmniejszenie mocy maksymalnej silnika o zapłonie samoczynnym. Na rys. 1.44 jest pokazany wykres zmienności dopuszczalnego stopnia zadymienia w skali Boscha w zależności od mocy silnika. Skala ta powstała w oparciu o metodę określania stopnia zadymienia polegającą na porównaniu zaciemnienia bibuły filtracyjnej, przez którą przepuszczono spaliny, z wzorcem.



Rys. 1.44. Zależność dopuszczalnego stopnia zadymienia spalin od mocy silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym

Graniczny stopień zadymienia odpowiada oczywiście określonemu współczynnikowi nadmiaru powietrza i odpowiedniej wartości mocy przypadającej na jednostkę objętości skokowej.

Wielkości te charakteryzują jakość procesu spalania w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym.

Walkę z dymem w spalinach prowadzi się w dwu kierunkach:

- neutralizując spaliny na drodze katalitycznego dopalania nieprereagowanych do końca składników paliwa,

- organizując proces w taki sposób aby nie nastąpiło spalanie niezupełne.

W tym wstępnym rozdziale zasygnalizowano szereg zagadnień związanych z organizacją i przebiegiem procesów spalania zachodzących w najczęściej spotykanych urządzeniach technicznych. Punktem wyjścia analizy był opis szeregu takich urządzeń. Przeprowadzono go posługując się pojęciami prostych procesów, które okazały się w bardzo wielu przypadkach wspólne, niezależnie od urządzenia w jakim zachodzą.

W związku z tym sklasyfikowano też te procesy przyjmując jako kryterium nie miejsce, w którym występują lecz ich właściwości fizyczne.