

4. SPALANIE PALIW CIEKŁYCH

4.1. Ważniejsze czynniki kontrolujące spalanie paliw ciekłych

W procesie spalania paliw ciekłych można wyróżnić dwie fazy: odparowania, a następnie spalania par, dlatego na szybkość spalania paliw ciekłych dominujący wpływ mają następujące czynniki:

- parowanie cieczy,
- mieszanie par z utleniaczem,
- kinetyka chemiczna reagowania paliwa z tlenem.

Szybkość parowania cieczy zależy przede wszystkim od strumienia ciepła dopływającego q do paliwa ciekłego, dlatego w kwasiustalonych warunkach wrzenia szybkość parowania m_p można określić jako

$$m_p = \frac{q}{L_p} \quad (4.1)$$

gdzie L_p jest ciepłem parowania.

Dwa pozostałe czynniki – szybkość mieszania i kinetyka chemiczna – mają podobny wpływ na szybkość spalania, jak dla paliw gazowych. Znaczenie wymienionych czynników dla szybkości spalania paliwa ciekłego zależy w dużej mierze od geometrii, scharakteryzowanej liniowym wymiarem l (rys. 4.1).

Paliwo ciekłe rozpylone na drobne krople ($l < 10^{-5}$ m)

Małe krople szybko parują, a pary tworzą z powietrzem homogeniczną mieszaninę palną. Płomień ma charakter kinetyczny, jak podczas spalania gazu. Szybkość spalania paliwa ciekłego jest **wówczas** zdeterminowana przez prędkość propagacji płomienia.

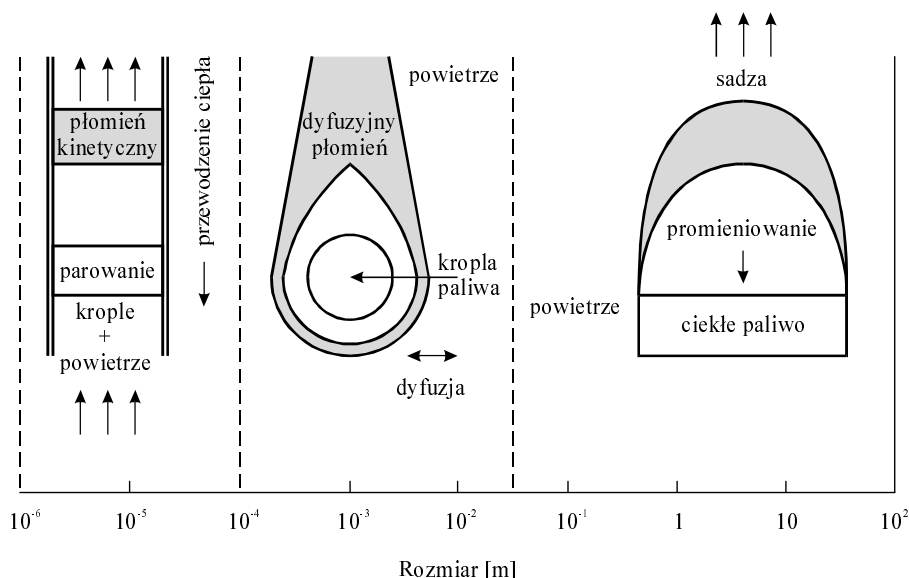
Paliwo ciekłe rozpylone na większe krople (10^{-5} m $< l < 10^{-3}$ m)

Krople paliwa ciekłego spalają się indywidualnie. Wokół kropli tworzy się dyfuzyjny płomień, do którego tlen dopływa z otoczenia, a pary dopływają z powierzchni kropli. Szybkość spalania kropli paliwa jest równa szybkości parowania.

Paliwo ciekłe o znacznej powierzchni ($l > 10^{-2}$ m)

Przy tych rozmiarach spalanie ma charakter pożaru zbiornika. Unoszące się gorące produkty spalania powodują napływ nad powierzchnię cieczy chłodniejszego powietrza, zmniejszając w ten sposób gradient temperatury i przejmowany przez paliwo strumień ciepła przez przewodzenie. Dostęp powietrza do par jest utrudniony, dlatego płomień jest bardzo bogaty i produkuje sadzę. Ciepło przekazywane jest od płomienia do paliwa głównie przez promieniowanie.

Szybkość spalania w dużych zbiornikach jest znacząco zdeterminowana ruchami powietrza (wiatr). Duże pożary indukują silną konwekcję swobodną, skrajnym tego przypadkiem jest *wir pożarowy*.



Rys. 4.1. Formy płomienia podczas spalania paliw ciekłych zależnie od rozmiaru geometrycznego

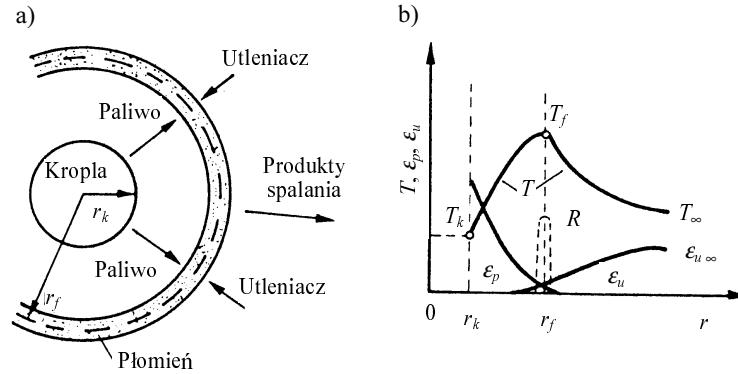
4.2. Spalanie pojedynczej kropli paliwa ciekłego

4.2.1. Sferyczno-symetryczny model spalania kropli

Spalanie paliw ciekłych w większości zastosowań polega na ich rozpyleniu i spalaniu zbioru kropeł, dlatego ważny jest mechanizm spalania pojedynczej kropli.

Podczas spalania w spokojnej atmosferze kropla paliwa ciekłego jest otoczona płomieniem, od którego do kropli jest przekazywany strumień ciepła q , przez przewodnictwo i promieniowanie. Przejmująca ciepło kropla, której temperatura jest tylko kilka stopni poniżej punktu wrzenia paliwa [5], intensywnie paruje na powierzchni, wydzielając na zewnątrz strumień pary. Z otoczenia w kierunku kropli dyfunduje strumień tlenu. Oba strumienie reagują ze sobą we froncie płomienia, który – idealizując – można uznać za sferyczną powierzchnię wokół kropli (rys. 4.2).

W temperaturze spalania paliw węglowodorowych (≈ 2000 K) szybkość reagowania znacznie przekracza szybkość dopływu substratów (par i tlenu) do płomienia, dlatego płomień ma charakter dyfuzyjny. Szybkość spalania kropli ciekłego paliwa, która jest równa szybkości parowania paliwa, jest wówczas kontrolowana przez szybkość dyfuzji tlenu do płomienia. Średnica płomienia, która zależy przede wszystkim od stechiometrii reakcji i udziału tlenu w otaczającym kroplę ośrodku gazowym, mieści się w zakresie $1,5 \div 10$ średnic kropli paliwa np. dla (n -heksanu: $2 \div 4$ średnice [5]).



Rys. 4.2. Model dyfuzyjnego spalania kropli paliwa: a) geometria płomienia, b) rozkłady temperatury oraz stężenia paliwa C_f i tlenu C_{O_2} [7]

W dyfuzyjnym reżimie spalanie kropli jest kontrolowane przez szybkość parowania, co prowadzi do tzw. „prawa” d_0^2 spalania kropli w postaci

$$d^2 = d_0^2 + K\tau \quad (4.2)$$

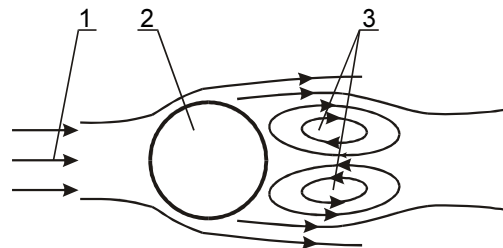
gdzie d_0 – średnica początkowa kropli, K – stała szybkości spalania [5, 7].

Wyznaczona doświadczalnie dla wielu paliw ciekłych wartość K jest w wąskim zakresie $7 \div 11 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ [3].

4.2.2. Wpływ niektórych czynników na spalanie kropli paliwa

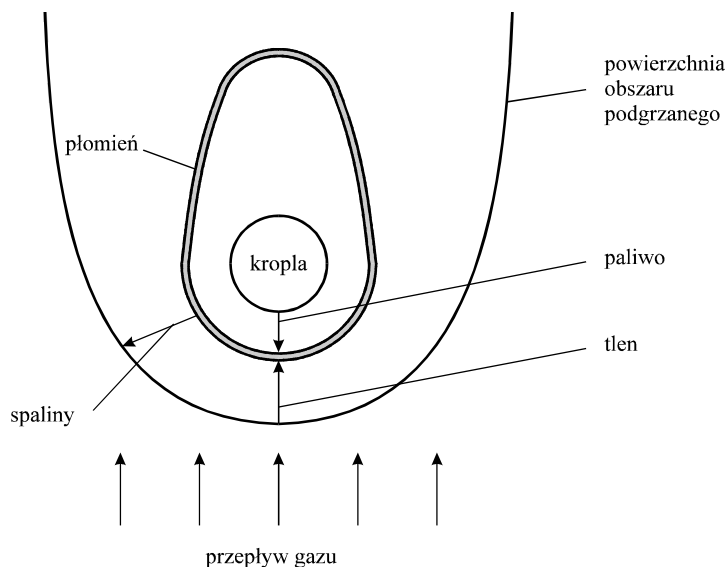
W rzeczywistości spalanie kropli przebiega w sposób nieustalony i jest poprzedzone czasem indukcji zapłonu, potrzebnym do nagrzania kropli do temperatury wrzenia. Czas indukcji zapłonu kropli stanowi mniej niż 20% czasu jej spalania [18].

W płomieniu kropla porusza się względem ośrodka gazowego, co powoduje zwiększenie prędkości dyfuzji tlenu z otoczenia do kropli przez zmniejszenie warstwy granicznej. Przy większych prędkościach opływu za kroplą tworzy się strefa recyrkulacji, która stabilizuje i intensyfikuje spalanie (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Wpływ konwekcji wymuszonej
(1 – przepływ, 2 – kropla,
3 – strefa recyrkulacji)

Przy zbyt dużych prędkościach opływu ($Re > 100$) następuje jednak zerwanie płomienia i zapłon kropli staje się niemożliwy [19]. W warunkach ziemskich kształt płomienia wokół kropli paliwa nie jest sferyczny, ponieważ zniekształca go konwekcja swobodna (rys. 4.4) oraz opływający kroplę czynnik gazowy.



Rys. 4.4. Wpływ konwekcji swobodnej na geometrię płomienia

Wskutek naprężeń stycznych między strugą gazu a powierzchnią cieczy wewnątrz kropli indukuje się ruch wirowy. W rezultacie następuje zwiększenie szybkości mieszania cieplejszej cieczy pod powierzchnią kropli z zimniejszą cieczą wewnątrz kropli i wzrost szybkości parowania. Jeżeli ruch wirowy cieczy wewnątrz kropli jest intensywny, to może występować rozpad kropli, co zwiększa szybkość spalania.

Rozpad kropli oleju może być spowodowany wewnętrznym ciśnieniem par (mikroeksplozje). Jeżeli paliwem jest olej, a zwłaszcza olej ciężki, płomień otaczający kroplę silnie promieniuje, a pochłaniana przez kroplę energia skupia się przede wszystkim w środku kropli. Jeżeli dochodzi wewnątrz kropli do wrzenia, to powstały pęcherz rozrywa kroplę. Zjawisko to występuje zwykle wtedy, kiedy paliwo ciekłe jest wieloskładnikowe. Lżejsze frakcje z wnętrza kropli nie zdążą przedysfundować do powierzchni kropli nim zostaną podgrzane do wrzenia, tworząc wewnątrz kropli pęcherz [12]. Efekt mikroeksplozji jest wykorzystywany do poprawy rozdrobnienia kropli oleju w płomieniu. Do oleju dodaje się wodę, która ma niższą temperaturę wrzenia niż olej, co powoduje rozerwanie kropli paliwa przed spalaniem.

W rzeczywistych warunkach spalania na **czas spalania kropli oleju** wpływa ponadto wiele innych czynników, jak: rozpylenie paliwa, turbulencja, temperatura i stężenie tlenu, dlatego trudno jest analitycznie określić długość płomienia rozpylonego paliwa ciekłego [19]. W warunkach konwekcji przestaje obowiązywać „prawo” d_0^2 szybkości spalania kropli paliwa ciekłego – w przypadku laminarnego przepływu raczej jest to wykładnik $2/3$, a dla przepływu turbulentnego bliski 1 [5].

Spalanie kropeł ciężkiego oleju jest bardziej złożone niż oleju lekkiego, ponieważ rozmiary kropeł są większe, nagrzewanie jest bardziej nierównomierne, a ponadto następuje termiczny rozkład **paliwa**. Najpierw z wierzchnich warstw kropli parują lekkie frakcje oleju, które spalają się płomieniem wokół kropli. Następnie ulegają krakingowi ciężkie frakcje oleju, a produkty pirolizy zasilają płomień.

Z pozostałości koksowej tworzy się na powierzchni kropli powłoka, blokująca wypływ gazów z kropli. Wydzielane wewnątrz kropli gazy i pary tworzą pęcherze, powodując wzrost ciśnienia w niej. Następująca przy pewnym ciśnieniu mikroeksplozja powoduje rozerwanie powłoki i rozpad kropli (rys. 4.5a).

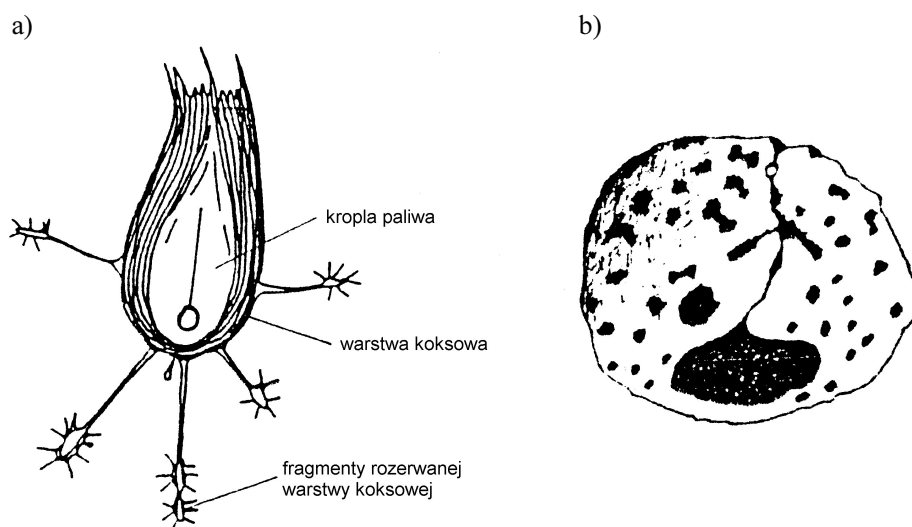
Koksowa pozostałość po mikroeksplozji, zwana cenosferą, tworzy twardą, pustą w środku skorupę o rozmiarach zbliżonych do średnicy wyjściowej kropli oleju (rys. 4.4b). Pozostałość koksowa, która zawiera przede wszystkim węgiel, wymaga znacznie większego czasu do spalania niż spalanie par, dlatego determinuje długość płomienia. Umownie spalanie kropeł ciężkiego oleju można podzielić na cztery etapy:

I – czas indukcji zapłonu – zakończony zapłonem lekkich frakcji oleju (np. 440 K dla mazutu M-40B i 550 K dla gudronu [12]),

II – spalanie – parowanie, kraking ciężkich frakcji oleju, formowanie się powłoki koksowej,

III – mikroeksplozja – rozerwanie koksowej powłoki,

IV – dopalanie cząstek koksu olejowego (rys. 4.5b).



Rys. 4.5. Model spalania kropli ciężkiego oleju (a), cząstka koksu olejowego (b) [7]

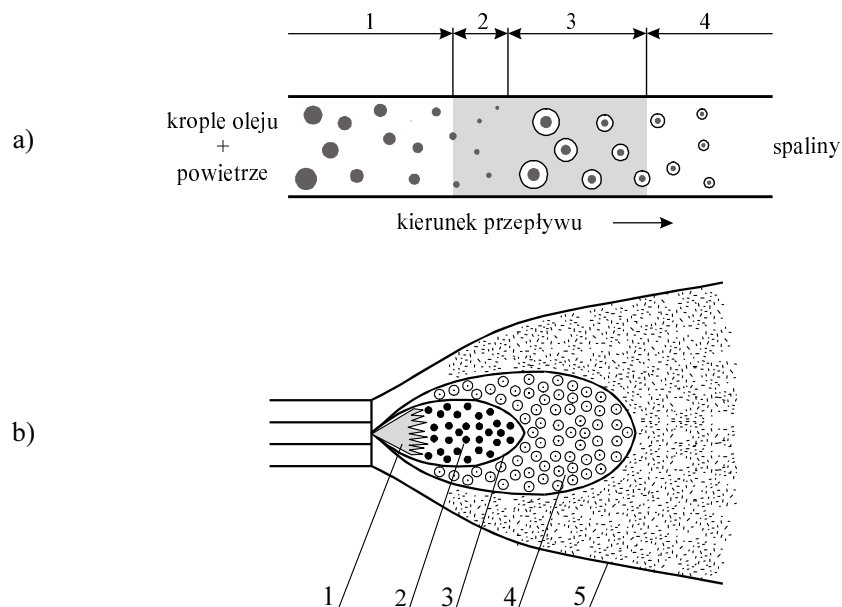
Modelowanie procesu spalania kropeł oleju ciężkiego jest znacznie trudniejsze niż w przypadku spalania kropeł oleju lekkiego, który nie tworzy pozostałości koksowej.

4.3. Płomień rozpylonego paliwa ciekłego

4.3.1. Struktura płomienia

W praktyce spalanie paliw ciekłych odbywa się w formie rozdrobnionej na krople, którą tworzy struga rozpylonego paliwa w powietrzu. Tak się dzieje w cylindrze silnika z zapłonem samoczynnym lub za palnikiem olejowym. Struktura płomienia rozpylonego paliwa ciekłego jest bardziej skomplikowana niż płomienia gazowego, ponieważ występują w nim zjawiska dyspersji i parowania cieczy, a ponadto oddziaływanie kropeł ze sobą [7]. Znaczenie ma lotność paliwa – na przykład benzyny szybko odparowują i płomień ma charakter homogeniczny. Nafty i oleje mają mniejszą lotność, dlatego przede wszystkim spalają się w formie indywidualnych kropeł.

Jednowymiarowy model płomienia rozpylonego oleju przedstawiono na rysunku 4.6a. Rozpylone w powietrzu krople, zbliżając się do płomienia, nagrzewają się i parują. W pierwszej strefie płomienia następuje zapłon par i spalanie homogeniczne, a następnie spalają się indywidualnie krople oleju (spalanie heterogeniczne). Za strefą płomienia występuje strefa dopalania większych kropeł i produktów spalania [18].

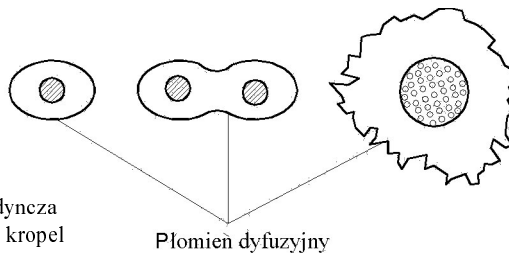


Rys. 4.6. Struktura płomienia rozpylonego oleju: a) jednowymiarowy płomień (1 – strefa parowania, 2 – strefa homogenicznego spalania, 3 – strefa heterogenicznego spalania, 4 – strefa dopalania), b) spalanie w żagwi (1 – struga rozpylonej cieczy, 2 – strefa parowania, 3 – strefa zapłonu, 4 – strefa spalania indywidualnego kropeł, 5 – granice płomienia)

W płomieniu za palnikiem olejowym dzieją się bardziej złożone procesy, ponieważ warunki spalania w chmurze kropeł różnią się od spalania pojedynczej kropli. W sąsiedztwie wylotu z dyszy tworzy się strefa o dużej koncentracji kropeł paliwa, w której krople intensywnie parują. Dostęp tlenu do tej strefy z otaczającego strumienia powietrza jest utrudniony, dlatego wewnątrz nie ma spalania, płomień natomiast lokuje się na granicy strefy. W drugiej strefie następuje rozrzedzenie kropeł, które mogą się spalać w niej indywidualnie; za nią jest strefa dopalania (rys. 4.6b).

Duża koncentracja kropeł u wylotu dyszy powoduje, że krople oddziałują ze sobą (kolizje), a ponadto występuje aerodynamiczne oddziaływanie kropeł z ośrodkiem gazowym, skutkujące wtórnym rozpadem kropeł. Kolizje kropeł prowadzą do łączenia się kropeł, chociaż obserwuje się też ich odbicia [7]. Uważa się także, że bardzo istotne dla szybkości spalania są mikroeksplozje kropeł oleju.

Zbliżenie kropeł może mieć istotny wpływ na formę ich spalania. Jeżeli odległość między dwoma palącymi kroplami zbytnio zmaleje, to wokół nich powstanie wspólny płomień, a szybkość spalania zmaleje o około 50% [3]. Duża koncentracja kropeł w chmurze utrudnia dostęp tlenu do niej, uniemożliwiając w skrajnym przypadku spalanie indywidualne kropeł. Wówczas cała chmura zostaje otoczona dyfuzyjnym płomieniem, który od wewnątrz jest zasilany strumieniem pary od kropeł, natomiast tlen dyfunduje do niego od zewnątrz (rys. 4.7). Taka forma spalania, zwanego **grupowym**, nie jest korzystna, ponieważ jej intensywność jest znacznie mniejsza od spalania indywidualnego kropeł, a ponadto sprzyja tworzeniu się sadzy.



Rys. 4.7. Formy spalania kropeł paliwa: pojedyncza kropla, dwie krople, spalanie grupowe chmury kropeł

Płomień dyfuzyjny

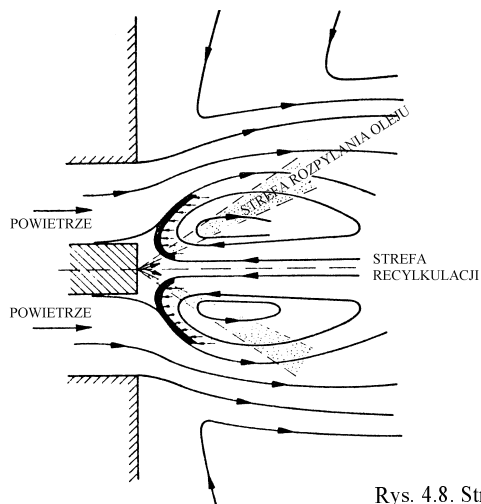
Te trudne i niezupełnie poznane zjawiska mikroeksplozji, spalania grupowego oraz wtórnego rozpadu i kolizji kropeł, ważne dla oceny długości płomienia olejowego, są przedmiotem obliczeń w modelowaniu numerycznym spalania paliw ciekłych.

4.3.2. Zawirowany płomień rozpylonego paliwa ciekłego

Zawirowanie strugi powietrza, do której centralnie rozpylone zostaje paliwo ciekłe, powoduje wystąpienie wewnętrznej strefy recyrkulacji spalin wzbogaconych parami paliwa, z możliwością pojawienia się kropeł paliwa [13]. Recyrkulacja gorących spalin, które mieszają się ze strugą rozpylonego paliwa i świeżym powietrzem, powoduje gwałtowne parowanie kropeł cieczy, zwiększenie szybkości spalania i poprawę stabilności płomienia.

Silne zawirowanie strumienia powietrza ($S \geq 0,6$) powoduje, że struktura płomienia staje się zdeterminowana przez aerodynamikę przepływu powietrza, natomiast kierunek strugi rozpylonego paliwa ciekłego ~~jest mniej ważny~~.

Objętościowa intensywność wydzielania ciepła w zawirowanym płomieniu olejowym wynosi około $2,3 \cdot 10^4 \text{ W/m}^3$ [1]. Zawirowany płomień rozpylonego oleju schematycznie przedstawiono na rysunku 4.8 [1].



Rys. 4.8. Struktura zawirowanego płomienia rozpylonego oleju

4.3.3. Przekazywanie ciepła od płomienia olejowego

Charakterystyczną cechą płomienia olejowego jest jego silne „świecenie” w kolorze żółtym. Żółta barwa jest spowodowana znaczną zawartością sadzy w płomieniu olejowym. Ciężkie węglowodory, które są składnikiem olejów, rozkładają się termicznie z wydzielaniem sadzy, sprzyja temu zwłaszcza dyfuzyjny charakter spalania.

Gazowe składniki spalin, jak H_2O i CO_2 , także pochłaniają i emitują promieniowanie, ale selektywnie, tylko w pewnych pasmach, sadza natomiast promieniuje w przybliżeniu jak ciało doskonale czarne, które ma ciągłe widmo promieniowania. Maksimum promieniowania przypada na barwę żółtą.

Zdolność płomienia do przekazywania ciepła przez promieniowanie wyraża współczynnik emisji ε . Określenie emisyjności sadzy w płomieniu paliw ciekłych jest skomplikowane, ponieważ wymagana jest znajomość koncentracji sadzy oraz parametrów geometrycznych jej cząstek. Na podstawie wyników badań doświadczalnych Hottel i Sarofim [6], dla średnic sadzy d , mniejszych od długości fali promieniowania λ ,

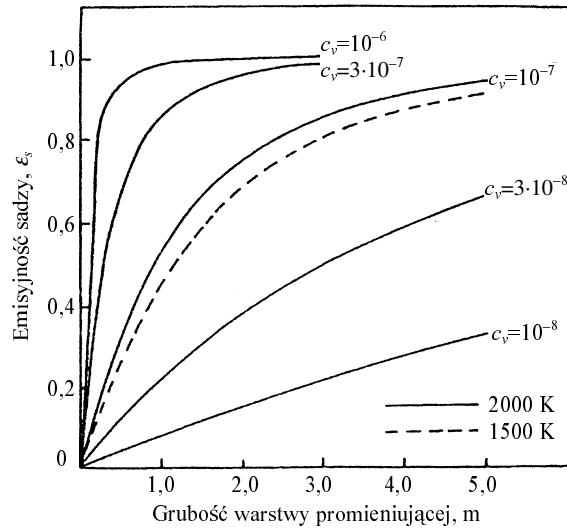
$$d < 0,1\lambda \quad (4.3)$$

uzyskali zależność

$$\varepsilon_s = 1 - (1 + k c_v T_g l / c_2)^{-4} \quad (4.4)$$

w której: c_2 – stała Plancka, c_v – objętościowa koncentracja sadzy w płomieniu, k – stała zależna od parametrów geometrycznych sadzy, l – grubość warstwy promieniującej.

Znając wartość stałej k , można obliczyć emisyjność dla danej temperatury płomienia w funkcji stężenia sadzy i grubości warstwy promieniującej. Wartość współczynnika k dla ciężkich olejów jest w zakresie $10\div 40$. Na rysunku 4.9 przedstawiono wyniki obliczeń ε_s dla wartości $k = 15$. Na przykład dla parametrów: grubość warstwy promieniującej $l = 3$ m, temperatura gazu $T_g = 2000$ K i koncentracja sadzy $c_v = 10^{-7}$ (ok. 200 mg/m^3), otrzymano $\varepsilon_s = 0,8$. Zdolności radiacyjne płomienia olejowego powodują, że około 90% ciepła z płomienia jest przekazywana przez promieniowanie.



Rys. 4.9. Wpływ koncentracji sadzy na emisyjność promieniowania w zależności od grubości warstwy promieniującej

4.4. Rozpylanie paliw ciekłych

Paliwa ciekłe spala się w postaci rozpylonej, ponieważ rozdrobnienie na krople zapewnia dużą intensywność parowania cieczy. Z tego powodu rozpylanie ma bardzo ważne znaczenie dla jakości spalania paliw ciekłych.

4.4.1. Mechanizmy rozpylania strugi cieczy

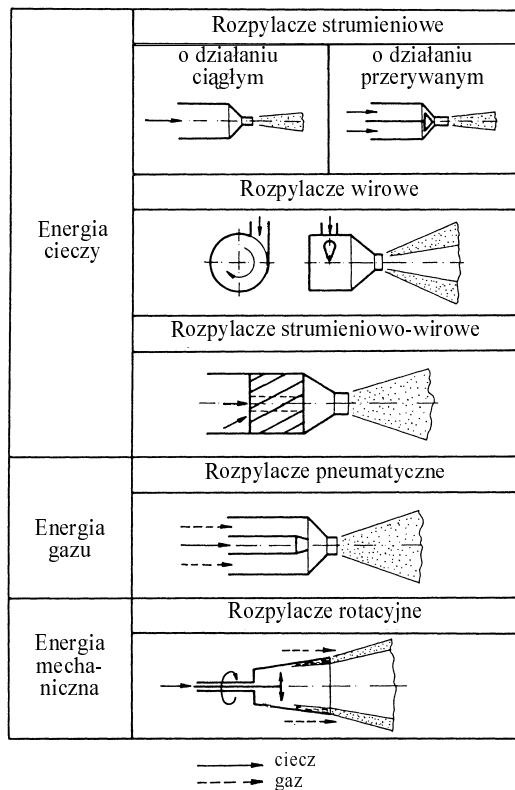
Istota rozpylania cieczy w strudze polega na pokonaniu napięcia powierzchniowego cieczy przez siły zewnętrzne lub wewnętrzne:

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

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

c) zewnętrzne siły mechaniczne, elektrostatyczne i ultradźwięków.

Na rysunku 4.10 przedstawiono schematycznie rozpylacze należące do wymienionych grup [12]. W praktyce największe zastosowanie znalazły dwa pierwsze z wymienionych typów rozpylaczy.



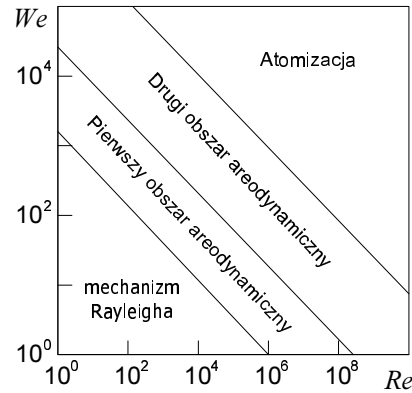
Rys. 4.10. Klasyfikacja rozpylaczy [12]

Rozpylacz strumieniowy uzyskuje się, jeżeli w ścianie przewodu wypełnionego cieczą wywierci się mały otwór, przez który wypływa struga cieczy. Rozpad strugi na krople jest złożonym, nie całkiem poznanym zjawiskiem, w którym decydującą rolę odgrywają siły: bezwładności, lepkości i napięcia powierzchniowego. Relacje tych sił można wyrazić za pomocą dwóch liczb bezwymiarowych, charakterystycznych dla procesu rozpylania strugi cieczy:

- Reynoldsa $Re = (wL)/\nu$,
- Webera $We = (\rho_c w^2 L)/\sigma$,

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

W zależności od wartości liczb Re i We przyjęto wyróżniać cztery obszary rozpylania cieczy (rys. 4.11).

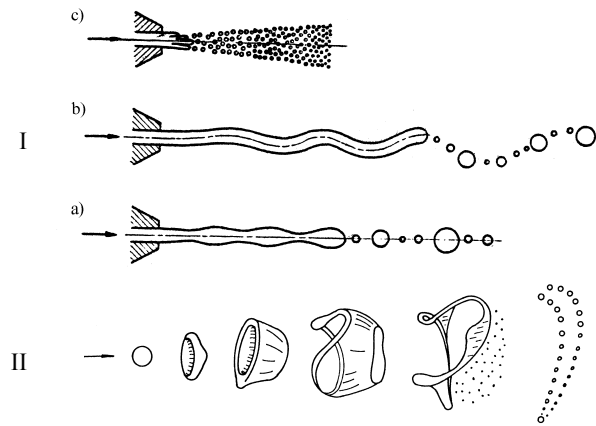


Rys. 4.11. Zakresy rozpylania cieczy

W obszarze Rayleigha postulowany jest kapilarny mechanizm rozpadu strugi cieczy – naruszenie równowagi sił bezwładności i napięcia powierzchniowego ($We > 4$) powoduje symetryczne zaburzenia strugi (rys. 4.12Ia) o długości fali $\lambda/L \cong 4,5$ prowadzące do jej rozpadu na krople o średnicy d_0 [15]:

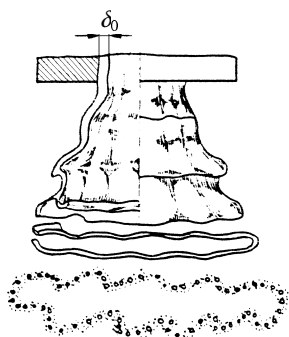
$$d_0 \cong 1,89L \quad (4.5)$$

Na poruszającą się w gazie kropkę działają naprężenia, powodując jej deformację i wtórny rozpad (rys. 4.12 – II) [12]. Jakość rozpylania nie jest jednak zadowalająca, ponieważ rozpad strugi odbywa się daleko od wylotu, a krople są zbyt duże.



Rys. 4.12. Rozpylanie cieczy w strudze: I) pierwotny rozpad strugi (prędkość wypływu rośnie od a do c), II) wtórny rozpad kropel

Słabe aerodynamiczne oddziaływanie gazu na strugę cieczy występuje w drugim obszarze rozpylania (rys. 4.11), objawiając się niesymetrycznymi jej zaburzeniami, które powodują jednak rozpad strugi na stosunkowo duże krople – rozmiarów średnicy strugi. Dopiero w trzecim obszarze oddziaływanie gazu nasila się, skutkując zmniejszeniem rozmiarów kropli (rys. 4.12Ib). Atomizację cieczy obserwuje się dla wielkich prędkości wypływu strugi, kiedy liczby Re i We osiągają duże wartości (obszar czwarty) – struga rozpada się już u wylotu dyszy, a krople są dużo mniejsze od średnicy strugi (rys. 4.12Ic).



Rys. 4.13. Mechanizm powstawania kropeł w rozpylaczu wirowym (δ_0 – grubość warstwy cieczy)

Rozpylacz wirowy działa na zasadzie wykorzystania sił odśrodkowych oddziałujących na opuszczającą dyszę ciecz, w której nadano jej szybki ruch obrotowy (rys. 4.13).

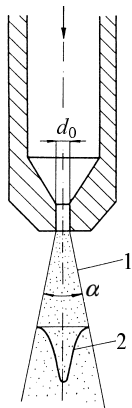
W powłoce cieczy powstają fale wzdłużne i poprzeczne, dążące do segmentacji cieczy. Przy większych prędkościach wypływu oddziaływanie aerodynamiki przyspiesza rozpad powłoki, zanim fale się rozwiną [7].

Rozpylacz pneumatyczny wykorzystuje do rozpylania cieczy energię sprężonego gazu lub pary. Naprężenia styczne, powstające wzdłuż kontaktu cieczy (w postaci strugi lub powłoki) z gazem, powodują jej segmentację na krople. Ułatwiony jest także wtórny rozpad kropeł.

Rozpylacz obrotowy (rotacyjny) działa na podobnej zasadzie jak rozpylacz wirowy – wirowy ruch cieczy, nadany przez wirującą u wylotu tarczę (dysk, czasza lub kielich), powoduje, że film cieczy odrywa się od krawędzi spływowej i ulega rozpadowi na krople [12, 19].

4.4.2. Przykłady rozpylaczy olejowych

Strumieniowy rozpylacz przelotowy (rys. 4.14) ma prostą budowę, w zakresie ciśnień $\Delta p = 0,3 \div 1$ MPa ma marną jakość rozpylania i niewielki kąt rozwarcia strugi $\alpha = 5 \div 15^\circ$ [1, 7]. Naprawdę dobre rozpylanie z tego typu rozpylacza uzyskuje się, gdy ciśnienie rozpylania $\Delta p \geq 5$ MPa. Z obawy o zatkanie, średnica otworu wylotowego powinna mieć $d_0 > 0,5$ mm.



Rys. 4.14. Budowa strumieniowego rozpylacza przelotowego:

1 – struga,
2 – profil strugi

Mimo tej niekorzystnej charakterystyki rozpylacze strumieniowe mają ważne zastosowanie w tłokowych silnikach spalinowych z zapłonem samoczynnym, ale dla poprawy rozpylania ciśnienie wtrysku osiąga w nich 200 MPa (rozdz. 8).

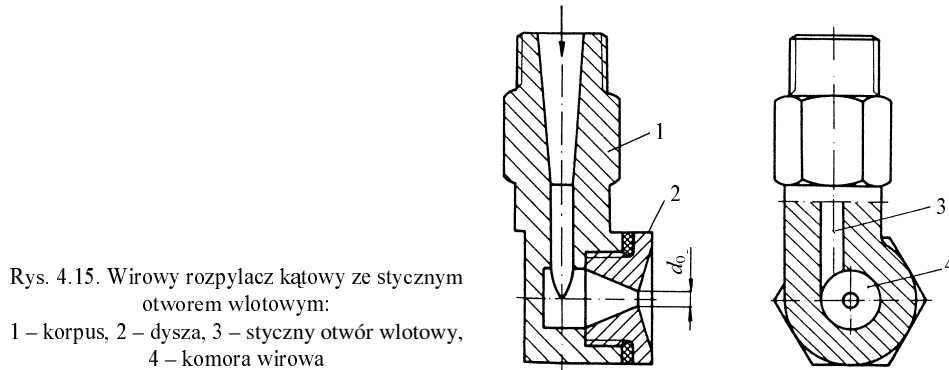
Rozpylacze wirowe są powszechnie stosowane w palnikach na paliwo ciekłe, dlatego istnieje wiele typów tych rozpylaczy. Najważniejsze zalety wirowych rozpylaczy to:

- prosta budowa,
- pewność działania,
- dobra jakość rozpylania,
- małe zapotrzebowanie mocy.

Najważniejsze wady rozpylaczy wirowych to:

- trudności w rozpylaniu bardzo lepkich cieczy,
- mały zakres regulacji wydatku.

Najbardziej rozpowszechnione są jednostopniowe rozpylacze wirowe (nieregulowane). Zawirowanie cieczy następuje za pomocą stycznych otworów lub dzięki wkładce zawirowującej. Ze względu na kąt wypływu rozróżnia się jednostopniowe zawirowywacze osiowe i kątowe (rys. 4.15). Typowe dane dla jednostopniowych rozpylaczy wirowych: średnica otworu wylotowego $d_0 = 2 \div 6$ mm, strata ciśnienia „na rozpylaczu” $\Delta p = 0,12 \div 0,25$ MPa, kąt rozwarcia strugi $\alpha = 45 \div 90^\circ$.

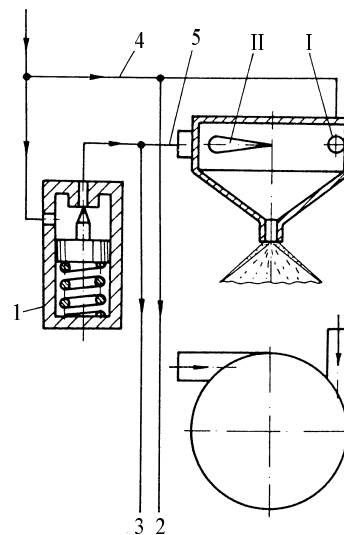


Rys. 4.15. Wirowy rozpylacz kątowy ze stycznym otworem wlotowym:
1 – korpus, 2 – dysza, 3 – styczny otwór wlotowy,
4 – komora wirowa

Wirowe rozpylacze regulowane dzielą się na:

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

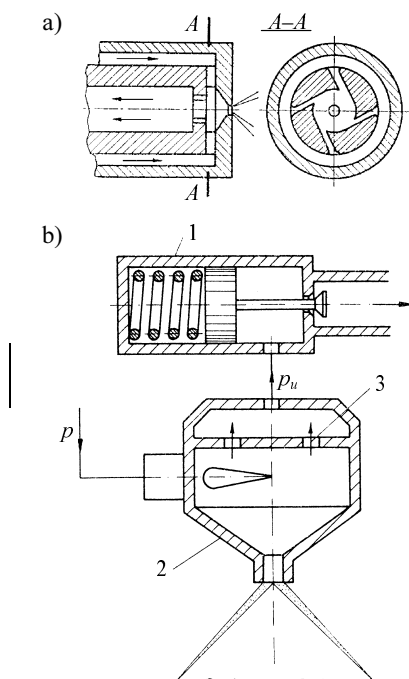
Rozpylacze dwustopniowe mają dwa stopnie zasilania. Na rysunku 4.16 pokazano rozpylacz dwuzakresowy, w którym zmiana zakresu zasilania następuje pod działaniem ciśnienia zasilającego oleju. Jeżeli ciśnienie jest dostatecznie duże, tłok ugina sprężynę, a iglica, wysuwając się z otworu, dołącza dodatkowy przewód paliwowy do dyszy.



Rys. 4.16. Schemat jednokomorowego rozpylacza dwuzakresowego: 1 – zawór, 2, 3 – odprowadzenie,
4, 5 – doprowadzenie oleju [12]

Inna konstrukcja **rozpylacza dwuzakresowego** opiera się na istnieniu dwóch koncentrycznych dysz, z których jedna pracuje z małym wydatkiem, a dysza dodatkowa jest zasilana, kiedy trzeba znacznie zwiększyć wydatek paliwa (np. podczas tzw. „dopalań” w silnikach samolotów odrzutowych) [12].

Duży stopień regulacji wydatku cechuje rozpylacz typu **upustowego**. Na rysunku 4.17a przedstawiono rozpylacz upustowy do turbin gazowych małej mocy [8]. Paliwo jest dostarczane w nadmiarze do komory wirowej rozpylacza, a jego nadmiar jest odprowadzany do zbiornika. Dobra jakość rozpylania, pomimo zmiany ciśnienia zasilania, wynika z dużej energii ruchu płynu w komorze wirowej rozpylacza. Rozpylacz zapewnia zakres regulacji wydatku co najmniej 1:10. Przedstawiony na rysunku 4.17b drugi typ upustowego rozpylacza ma komorę z tłokiem, którego trzpień znajduje się w otworze do przewodu wylotowego. Ciśnienie w cylindrze, działając na tłok, ugina sprężynę, przysmykając otwór; po jego zamknięciu cały strumień paliwa **zostanie** podawany do dyszy. Zakres regulacji wydatku wynosi 1:85 [12].



Rys. 4.17. Rozpylacz upustowy (a),
rozpylacz upustowy z zaworem (b): 1 – zawór,
2 – komora wirowa, 3 – otwory upustowe [12]

Rozpylacz ze zmienną powierzchnią otworu wylotowego, mimo dobrych właściwości regulacyjnych, rzadko są stosowane z powodu trudności eksploatacyjnych [12].

Rozpylacz pneumatyczny są powszechnie stosowane dzięki dobrym właściwościom rozpylającym; są nie do zastąpienia, kiedy trzeba rozpylać ciężkie oleje i emulsje. Najważniejsze zalety rozpylaczy pneumatycznych to:

- możliwość rozpylania cieczy o dużej lepkości,
- duży zakres regulacji wydatku,
- duża możliwość kształtowania geometrii strugi.

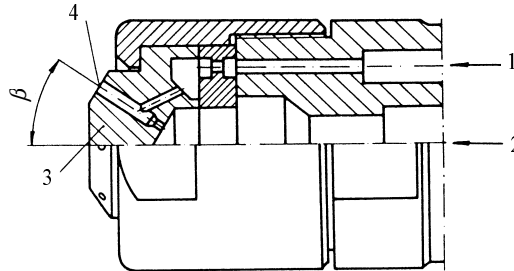
Najważniejsze wady rozpylaczy pneumatycznych to:

- konieczność posiadania źródeł **pary lub** sprężonego **gazu, powietrza**,
- większe zużycie energii w porównaniu do rozpylaczy ciśnieniowych.

Ważnym parametrem charakteryzującym rozpylacz pneumatyczny jest **zużycie czynnika gazowego** δ na jednostkę rozpylonego oleju. W nowoczesnych rozpylaczach pneumatycznych zużycie czynnika gazowego na rozpylanie wynosi $\delta = 0,06 \div 0,1$ (kg/kg).

Istnieje wiele typów rozpylaczy pneumatycznych, warto **natomiast** zapoznać się z **konstrukcją** rozpylacza typu Y (rys. 4.18), który charakteryzuje się dobrym rozpylaniem lepkich i gęstych cieczy [12]. Gaz i ciecz dopływają do przewodów wylotowych, gdzie się mieszają. Gaz u wylotu z dyszy rozpręża się, rozbijając ciecz na drobne cząstki. Otwory wylotowe, których liczba kształtuje się w zakresie $6 \div 12$, **pozwalają uzyskać** pożądaną formę **rozpylonego płomienia**. Wadą pneumatycznych rozpylaczy typu Y jest stosunkowo duże zużycie pary wodnej do rozpylania: $\delta = 0,1 - 0,12$.

Przedstawiony przegląd konstrukcji rozpylaczy, przeznaczonych przede wszystkim do palników olejowych, nie jest kompletny, brakuje w nim na przykład rozpylaczy rotacyjnych. Zainteresowany Czytelnik może znaleźć znacznie więcej informacji na ten temat w publikacji [12]. Rozpylacze paliw płynnych mają także ważne zastosowanie w spalinowych silnikach tłokowych i turbinowych. Informacje o ich budowie można znaleźć w specjalistycznej literaturze (np. w [10]).



Rys. 4.18. Rozpylacz pneumatyczny typu Y:
1 – ciecz, 2 – gaz, 3 – głowica rozpylacza,
4 – otwory wylotowe [12]

4.4.3. Charakterystyki rozpylaczy

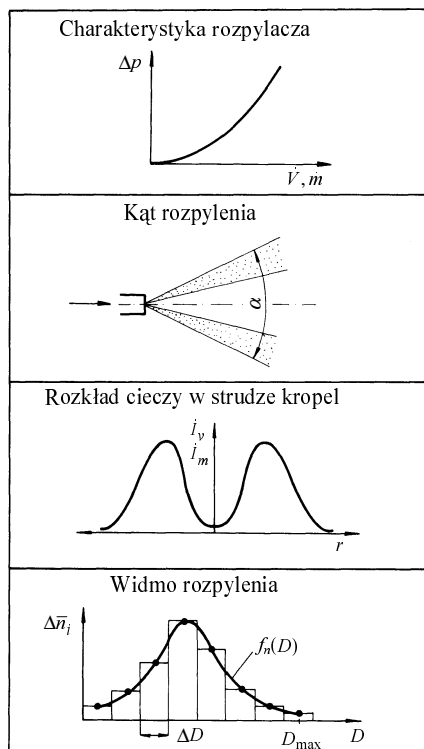
Rozpylacz cieczy jest charakteryzowany przez kilka parametrów, wśród których do najważniejszych należą (rys. 4.19):

- wydajność,
- kąt rozpylania,
- rozłożenie kropel,
- jakość rozpylania.

Wydajność ciśnieniowych rozpylaczy definiuje się jako zależność strumienia masy cieczy m od spadku ciśnienia „na rozpylaczu”

$$m = \mu A (2\rho_c \Delta p)^{0,5} \quad (4.7)$$

gdzie: A – pole powierzchni wypływu, μ – współczynnik wypływu, który zależy przede wszystkim od geometrii dyszy.

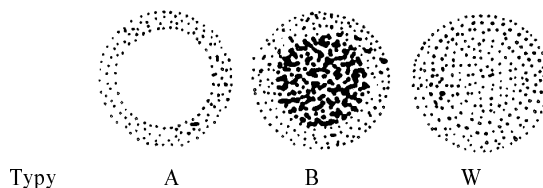


Wydajność rozpylaczy pneumatycznych jest funkcją ciśnienia cieczy, sparametryzowana wydatkiem czynnika rozpylającego.

Kąt rozpylenia strugi, który zwykle wiąże się z zasięgiem strugi, jest ważnym parametrem, mającym wpływ na kształt i długość płomienia. Ważne jest, żeby struga rozpylonego paliwa nie zderzała się ze ścianami dyfuzora palnika.

Rys. 4.19. Wybrane parametry rozpylaczy [7]

Różnicuje się także rozłożenie kropli paliwa wzdłuż promienia strugi, uzyskując różne cechy płomienia. Na rysunku 4.20 pokazano przykłady rozłożenia kropli w strudze paliwa z dyszy firmy Delavan [17].



Rys. 4.20. Rozkłady kropli w strudze paliwa: A – rurkowy, B – pełny, W – pełny specjalny [17]

Rozkład średnic kropli w strudze rozpylonej cieczy tworzy widmo rozpylania, czyli zależność między liczbą kropli Δn_i i średnicą kropli D_i (rys. 4.21)

$$f_n(D) = dn/dD \quad (4.8)$$

gdzie $n = \Delta n_i / N$ i N jest całkowitą liczbą kropli [12].

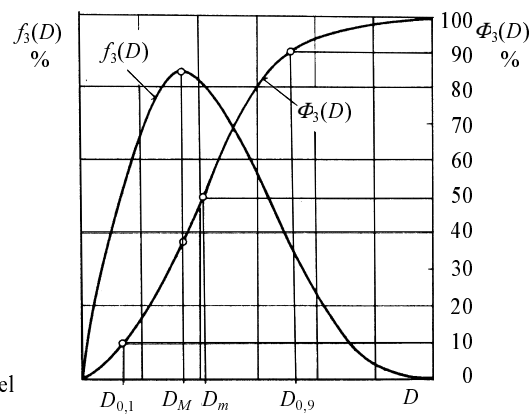
W praktyce ważną rolę pełni dystrybuanta Φ_n średnicy kropli D

$$\Phi_n(D) = \int_0^D f_n(D) dD \quad (4.9)$$

Do najbardziej znanych rozkładów Φ_n należy rozkład Rosina–Rammlera [10]

$$\Phi_3(D) = 1 - \exp [-(D/X)^\delta] \quad (4.10)$$

gdzie X i δ są parametrami rozpylania (rys. 4.21).



Rys. 4.21. Krzywe rozkładu kropli

Ważnym parametrem określającym jakość rozpylania jest średnia średnica kropli; można ją różnie zdefiniować [10]. Do najczęściej stosowanych definicji należą:

- średni rozmiar kropli: $SRK = [(\sum nD^3 / \sum nD)]^{0.5}$,
- średnica Sautera SMD (*Sauter Mean Diameter*): $SMD = \sum nD^3 / \sum nD^2$.

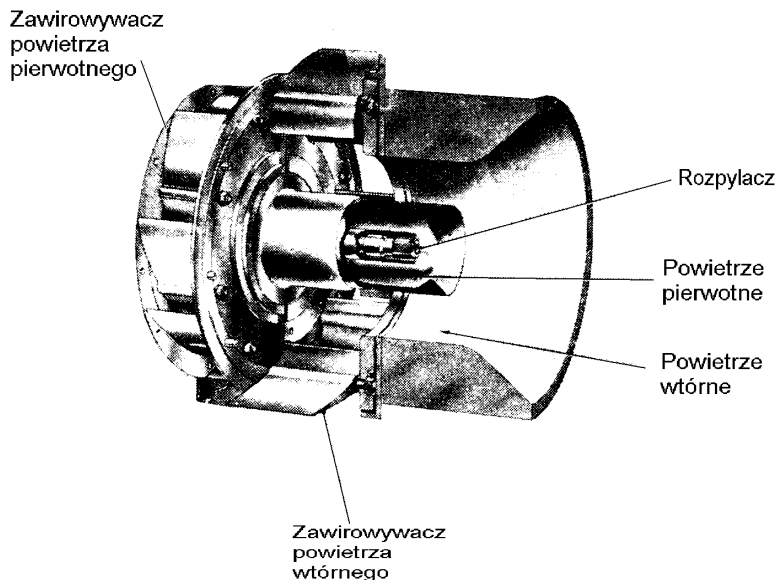
4.5. Palniki olejowe

Oleje mają zastosowanie w technice grzewczej, w technologii chemicznej oraz w energetyce, gdzie są spalane zwykle z użyciem palników olejowych, dla których wymagania określa norma PN-90/M-35011 [14].

Ważnym parametrem charakteryzującym palnik jest moc cieplna. Zakres mocy cieplnej palników olejowych jest bardzo szeroki, od kilkunastu kilowatów, dla małych urządzeń grzewczych, do ponad 40 MW, dla dużych wytwornic pary [9].

W urządzeniach opalanych lekkim olejem opałowym stosuje się przede wszystkim palniki z rozpylaczami ciśnieniowymi, rzadziej natomiast rozpylacze rotacyjne (w palnikach większej mocy). Ciśnienie rozpylania oleju w palnikach małej mocy jest w zakresie $0,8 \div 1,5$ MPa, a w palnikach dużej mocy – $2,3 \div 3$ MPa. Z zasady powietrze

do spalania podawane jest przez okrężną dyszę w formie zawirowanej, co zapewnia stabilność spalania i dobre wypalenie [16]. Na rysunku 4.22 pokazano konstrukcję palnika olejowego wyposażonego w dwa zawirowywacze powietrza.



Rys. 4.22. Palnik olejowy z ciśnieniowym rozpylaczem i zawirowaniem powietrza

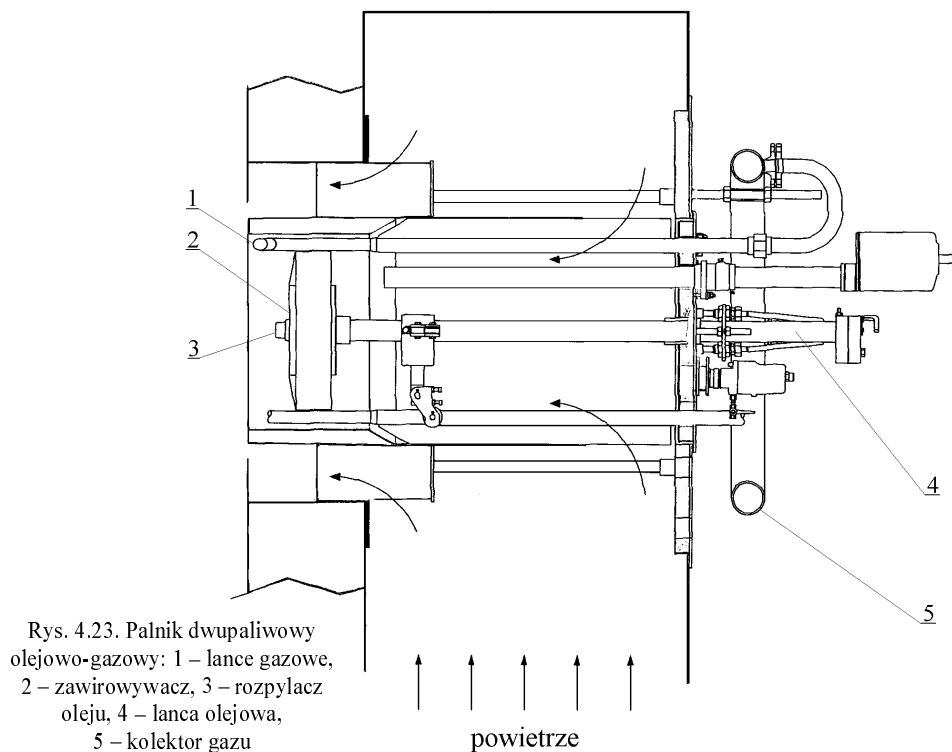
Palniki olejowe najczęściej są dostarczane przez producentów w postaci blokowej (zwanej inaczej agregatowej), do uruchomienia takiego palnika wystarczy jego dołączenie do zbiornika paliwa i zasilanie elektryczne [9]. Palnik blokowy jest zbudowany z trzech zespołów:

- rozpylania,
- aerodynamiki,
- sterowania.

Zespół rozpylania jest wyposażony w filtr paliwa, pompę olejową i rozpylacz. Zespół aerodynamiki ma wentylator nadmuchowy z regulacją strumienia powietrza do spalania i układ formowania wypływu powietrza; zespół sterowania natomiast układy: inicjowania płomienia, kontroli zgaśnięcia płomienia, bezpiecznego załączania i wyłączania palnika. W celu zmniejszenia lepkości oleju oraz stabilizacji wydátku i jakości rozpylania blokowe palniki olejowe mają wewnętrzne podgrzewacze oleju.

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania oleju lekkiego (EL) wynosi $11,22 \text{ m}^3/\text{kg}$, natomiast zalecany współczynnik nadmiaru powietrza dla palników olejowych $\lambda \approx 1,1$. Czerń spalin ze spalania oleju, będąca miarą udziału sadzy w spalinach, określana jest w skali Bacharacha; w warunkach ustalonej pracy nie powinna przekraczać 1 [4].

W praktyce przemysłowej często spotyka się palniki dwupaliwowe: olejowo-gazowe. Cechy konstrukcyjne obu typów tych palników oddzielnie pozwalają zbudować jeden zwarty palnik, który może być zasilany gazem lub paliwem ciekłym (rys. 4.23).

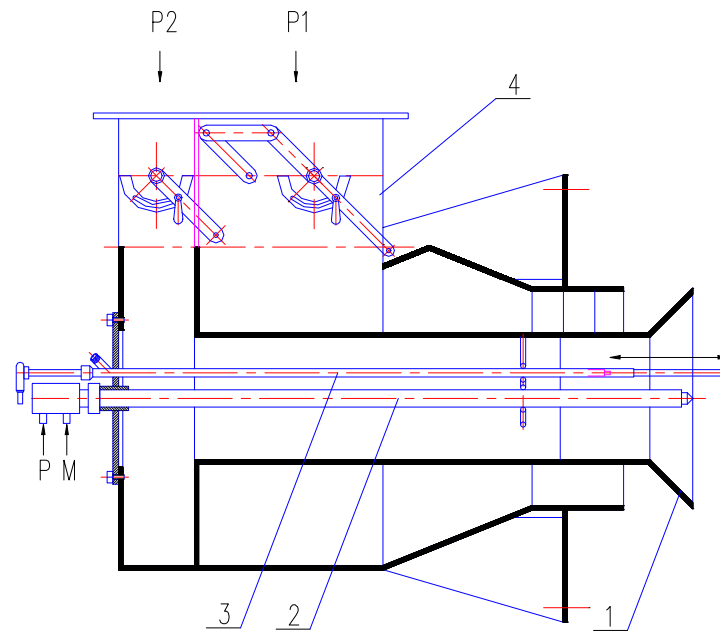


Rys. 4.23. Palnik dwupaliwowy olejowo-gazowy: 1 – lance gazowe, 2 – zaworowywacz, 3 – rozpylacz oleju, 4 – lancia olejowa, 5 – kolektor gazu

Odrębną grupę palników olejowych stanowią **kotłowe palniki rozpałkowe**, zwane palnikami **mazutowymi** (rys. 4.24). Ich charakterystyczna konstrukcja wynika z funkcji, jakie pełnią w kotłach parowych opalanych węglem. Mają one formę długich lanc (stąd inna nazwa: *lancowe*) zakończonych rozpylaczem, które przez specjalne otwory są wprowadzane w obręb kotła i wycofywane po zakończeniu pracy. W lance olejowe są wyposażone wirowe palniki pyłowe, gdzie są wbudowane centralnie na stałe.

Kotłowe palniki rozpałkowe są zasilane ciężkim olejem (najczęściej mazutem, rzadziej gudronem), mają wydajność w zakresie $0,5 \div 1,0$ t/h [12]. W celu uzyskania odpowiedniej płynności mazutu do jego transportu i magazynowania utrzymywany jest on w instalacji mazutowej w temperaturze 55°C . Dla umożliwienia rozpylania mazutu w palnikach jest on następnie podgrzewany do temperatury $65 \div 90^\circ\text{C}$, co wymaga wyposażenia kotła w parową instalację nagrzewania mazutu. Maksymalna dopuszczalna temperatura podgrzania mazutu wynosi $90 \div 125^\circ\text{C}$ [4].

Kotłowe palniki na ciężki olej mają rozpylacze typu ciśnieniowego lub pneumatycznego. Lepsze rozpylanie uzyskuje się, stosując rozpylacze pneumatyczne, które są ponadto bardziej trwałe i niezawodne niż rozpylacze ciśnieniowe. Wadą palników mazutowych z rozpylaniem pneumatycznym jest bardziej skomplikowana instalacja zasilania oraz straty pary na rozpylanie oleju [4].



Rys. 4.24. Lancowy palnik rozpalkowy: 1 – dyfuzor, 2 – lanca olejowa, 3 – elektroda zapalarki elektrycznej, 4 – skrzynia powietrzna (P – para wodna, M – mazut, P1, P2 – powietrze pierwotne i wtórne) [11]

Literatura

- [1] Beer J.M., Chigier W.A., *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers, London 1972.
- [2] Chigier W.A., *Energy, Combustion and Environment*, McGraw-Hill, New York 1981.
- [3] Chomiak J., *Podstawowe problemy spalania*, PWN, Warszawa 1977.
- [4] Furtak L. i in., *Warunki techniczne i odbioru kotłowni na paliwa gazowe i olejowe*, SGGiK, Warszawa 1995.
- [5] Glassman I., *Combustion*, 3rd Ed., Academic Press, Orlando 1996.
- [6] Hottel H.C., Sarofim A.F., *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York 1967.
- [7] Jarosiński J., *Techniki czystego spalania*, WNT, Warszawa 1996.
- [8] Kaczan B. i in., *Silniki turbospalinowe małej mocy*, WNT, Warszawa 1963.
- [9] Katalog Zakładu Budowy Urządzeń Kotłowych ZBUK w Katowicach, Katowice 1998.
- [10] Lefebvre A.H., *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere Publishing, New York 1983.
- [11] Materiały firmy TKW Combustion, Główno 2003.
- [12] Orzechowski Z., Prywert J., *Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych*, WNT, Warszawa 1994.
- [13] Petela R., *Paliwa i ich spalanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1982.
- [14] PN-90/M-35011 *Palniki przemysłowe na paliwa ciekłe. Wymagania ogólne*.
- [15] Sirignano W.A., Mehring C., *Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams*, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 26, 2000, s. 609–655.
- [16] Słupsek S., *Emisja zanieczyszczeń z procesu spalania paliw ciekłych*, Ochrona Powietrza, nr 4, 1991.
- [17] Technische Arbeitsblätter, materiały Max Weithaupt GmbH.
- [18] Williams F.A., *Combustion Theory*, The Benjamin, Menlo Park 1985.
- [19] Wójcicki S., *Spalanie*, WNT, Warszawa 1969.