

Rys. 1.17. Charakterystyka współczynnika napełnienia w zależności od kąta otwarcia przepustnicy i prędkości obrotowej silnika

opory przepływu, decydujące o napełnieniu cylindra, występują na biegu jałowym. Wraz ze wzrostem obciążenia, czyli podczas uchylania przepustnicy, opory przepływu maleją i napełnienie cylindra rośnie. Największa ilość ładunku jest zasysana do cylindra przy maksymalnym obciążeniu, gdy przepustnica jest całkowicie otwarta (rys. 1.17).

Średnie wartości współczynnika napełnienia uzyskiwane w najkorzystniejszych warunkach eksploatacyjnych wynoszą:

$$\eta_v = 0,6 \dots 0,85 \text{ w silnikach ZI,}$$

$$\eta_v = 0,75 \dots 0,9 \text{ w silnikach ZS.}$$

1.7.3. Doładowanie silników

W poprzednim podrozdziale stwierdzono, że moc użyteczna silnika zależy od masy ładunku doprowadzonego do cylindra. Z analizy wartości współczynnika napełnienia wynika, że w silnikach wykorzystujących do napełniania cylindra podciśnienie wytworzone podczas ruchu tłoka w najkorzystniejszych warunkach pracy do cylindra udaje się wprowadzić maksymalnie 80...90% ilości, która może się w nim zmieścić. Sposobem na poprawienie sprawności napełnienia cylindra, a tym samym na wzrost mocy silnika, jest wykorzystanie zewnętrznej siły do wtłaczania ładunku, dzięki czemu w cylindrze można zgromadzić nawet większą masę ładunku niż wynikająca z objętości skokowej. Sposób ten stanowi istotę doładowania silnika.

Doładowaniem silnika nazywa się dostarczanie świeżego ładunku do cylindra pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia atmosferycznego w celu zwiększenia masy ładunku zgromadzonej w cylindrze. Zwiększenie masy

ładunku i spalanie większej ilości paliwa prowadzi do wzrostu średniego ciśnienia użytecznego, a tym samym uzyskania większego momentu obrotowego i większej mocy silnika bez zmiany prędkości obrotowej wału korbowego lub objętości skokowej. Świeży ładunek podczas sprężania nagrzewa się, więc zmniejsza się jego gęstość. Aby wykorzystać pełny efekt doładowania, powietrze przed wprowadzeniem do cylindra zwykle ochładza się w tzw. chłodnicy powietrza doładowanego, dzięki czemu wzrasta jego gęstość.

Wzrost mocy uzyskany dzięki doładowaniu wyrażony w procentach mocy znamionowej silnika nazywa się **stopniem doładowania**. Większość czterosuwowych silników o zapłonie samoczynnym wykazuje stopień doładowania równy około 50%. W silnikach o zapłonie iskrowym jest on znacznie mniejszy.

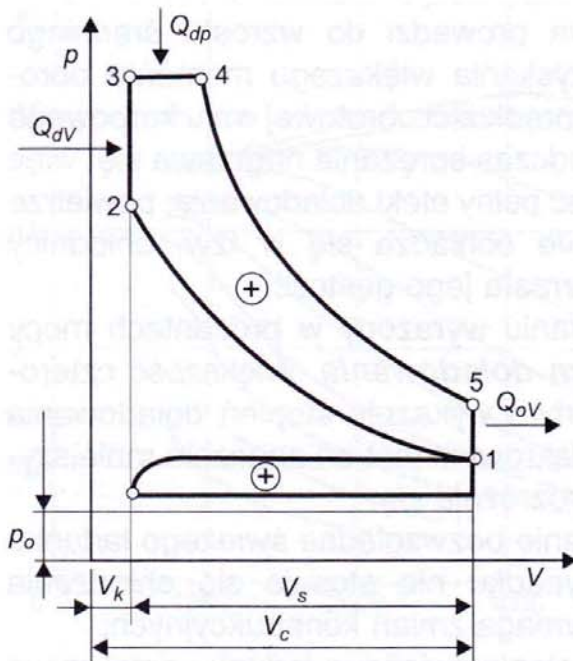
Zależnie od wartości ciśnienia ładunku rozróżnia się:

- **doładowanie niskie**, przy którym ciśnienie bezwzględne świeżego ładunku nie przekracza 150 kPa; w tym przypadku nie stosuje się chłodzenia powietrza doładowanego, a silnik nie wymaga zmian konstrukcyjnych;
- **doładowanie wysokie**, przy którym ciśnienie świeżego ładunku przekracza 150 kPa, a czasem osiąga nawet 300 kPa; w tym przypadku chłodzenie powietrza jest niezbędne, a elementy mechanizmu korbowego takiego silnika muszą być znacznie wzmocnione.

Ze względu na sposób zwiększania ciśnienia ładunku, rozróżnia się:

- **doładowanie sprężarkowe** – w tym sposobie zwiększanie ciśnienia powietrza wprowadzanego do cylindra odbywa się w sprężarce, a w zależności od typu sprężarki rozróżnia się:
 - **doładowanie mechaniczne**, wykorzystujące sprężarkę mechaniczną napędzaną od wału korbowego silnika;
 - **turbodoładowanie**, w którym powietrze jest sprężane w sprężarce napędzanej turbiną gazową zasilaną gazami spalinowymi opuszczającymi komory spalania poszczególnych cylindrów;
 - **doładowanie mieszane**, wykorzystujące sprężarkę mechaniczną i turbosprężarkę, pracujące równolegle;
- **doładowanie bezsprężarkowe**, wykorzystujące zjawiska dynamiki przepływu gazów, w którym rozróżnia się:
 - **doładowanie Comprex**, polegające na impulsowym sprężaniu powietrza przez stykające się z nim bezpośrednio gazy spalinowe w urządzeniu zwanym wymiennikiem ciśnienia;
 - **doładowanie dynamiczne**, uzyskiwane dzięki wykorzystaniu zjawiska rezonansu ciśnienia słupa powietrza w układzie dolotowym silnika.

Typowy dla silnika doładowanego wykres porównawczy przedstawiono na rysunku 1.18. Cechą charakterystyczną tego wykresu jest położenie dolnej pętli wymiany ładunku powyżej linii ciśnienia atmosferycznego. Ponadto linia napełniania cylindra położona jest wyżej niż linia wylotu spalin, czyli pętla wymiany ładunku jest dodatnim polem pracy. Wprowadzanie uprzednio sprężonego ładunku nie wymaga zużycia energii przez silnik. Należy jednak zauważyć, że w doładowaniu mechanicznym dodatnia praca wymiany ładunku



Rys. 1.18. Wykres porównawczy silnika doładowanego

Q_{dV} – ciepło doprowadzone przy stałej objętości,
 Q_{dp} – ciepło doprowadzone przy stałym ciśnieniu,
 Q_{oV} – ciepło odprowadzone przy stałej objętości,
 p_o – ciśnienie otoczenia

jest realizowana przez napęd mechaniczny z wału korbowego. Uwzględniając sprawność napędu oraz sprawność sprężarki należy podkreślić, że dodatnia praca wymiany ładunku jest okupiona większą co do wartości pracą odbieraną od wału korbowego silnika na napęd sprężarki. W przypadku turbodoładowania praca dodatnia, odpowiadająca polu wymiany ładunku, może być w pełni odzyskiwana z energii spalin traconej w przypadku doładowania mechanicznego. Prowadzi to do poprawy bilansu energii silnika turbodoładowanego, czyli do zwiększenia jego sprawności ogólnej.

Doładowanie bardzo dobrze pasuje do silnika o zapłonie samoczynnym. W tym silniku, oprócz podstawowej korzyści doładowania, czyli zwiększenia mocy silnika, wprowadzenie do cylindra powietrza pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego wpływa bardzo korzystnie na przebieg spalania. W silnikach doładowanych wtryskiwane do sprężonego powietrza paliwo łatwiej ulega samozapłonowi. Proces spalania przebiega spokojniej, a praca silnika jest mniej „twarda” (wolniejszy wzrost ciśnienia w cylindrze). Z tego względu doładowanie współcześnie stosuje się (poza nielicznymi wyjątkami) we wszystkich silnikach o zapłonie samoczynnym.

W silnikach o zapłonie iskrowym doładowanie nie jest powszechnie stosowane. W starszych rozwiązaniach silników ZI (gaźnikowych) występował problem umieszczenia sprężarki. Zastosowanie sprężarki przed gaźnikiem wymagało zastosowania odpowiedniego typu gaźnika, a w przypadku umieszczenia sprężarki za gaźnikiem istniało niebezpieczeństwo wybuchu mieszanki podczas sprężania. Problem ten rozwiązano po zastosowaniu układów wtrysku benzyny. W doładowanych silnikach z pośrednim wielopunktowym wtryskiem benzyny spręża się tylko powietrze, a paliwo jest wtryskiwane do części układu dolotowego o podwyższonym ciśnieniu. W silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem benzyny, w których paliwo wtryskuje się bezpośrednio do cylindrów,

doładowanie stosuje się coraz częściej. Kolejnym problemem, związanym z doładowaniem silników o zapłonie iskrowym z pośrednim wtryskiem paliwa, są straty przepłukiwania cylindrów, wynikające ze współotwarcia zaworów. W silnikach ZS, w których ładunkiem jest powietrze, w fazie przekrycia zaworów świeży ładunek przepłukuje cylinder w celu skuteczniejszego oczyszczenia go ze spalin. W przypadku silników ZI z wtryskiem pośrednim do cylindra jest wprowadzana sprężona mieszanka, która nie powinna być użyta do przepłukiwania cylindra. Straty ładunku powstające podczas przepłukiwania cylindra można zmniejszyć, opóźniając otwarcie zaworu dolotowego, prowadzi to jednak do pogorszenia przepłukania cylindra. Problem ten nie występuje w silnikach z bezpośrednim wtryskiem paliwa, w których podobnie jak w silnikach ZS cylinder napełniany jest powietrzem. Najistotniejszym problemem zastosowania doładowania w silniku o zapłonie iskrowym jest powstawanie przedwczesnych samozapłonów oraz spalania stukowego, wynikającego z podwyższenia ciśnienia w komorze spalania na skutek wyższej jego wartości na początku sprężania ładunku. Z tego względu w doładowanych silnikach ZI obniża się wartość stopnia sprężania. Poza doładowaniem sprężarkowym, stosowanym w ograniczonym zakresie, w silnikach o zapłonie iskrowym wykorzystuje się doładowanie dynamiczne, odpowiednio dobierając parametry budowy układu dolotowego.

Sposoby realizacji poszczególnych typów doładowania w silnikach samochodowych zostaną przedstawione w dalszej części podręcznika.

1.7.4. Proces wylotu spalin

Proces wylotu spalin zaczyna się pod koniec suwu rozprężania w chwili otwarcia zaworu wylotowego, a kończy się w chwili zamknięcia zaworu wylotowego następującego na początku suwu dolotu.

Zależnie od zasadniczej przyczyny wywołującej wypływ spalin z cylindra, cały proces wylotu w silniku czterosuwowym może być podzielony na trzy okresy.

Swobodny wylot spalin rozpoczyna się w chwili otwarcia zaworu wylotowego i trwa do chwili, w której prędkość tłoka zaczyna wypychać spaliny z cylindra. W okresie tym spaliny wypływają pod działaniem różnicy ciśnień w cylindrze i przewodzie wylotowym. Ilość wypływających spalin w tym okresie zależy od prędkości przepływu spalin zależnej od różnicy ciśnień oraz przekroju przelotowego przez zawór wylotowy (zawory wylotowe). W trakcie tego okresu prędkość spalin maleje, lecz wzrasta przekrój przelotowy wskutek zwiększającego się uchylenia zaworu.

W drugim okresie wylotu spaliny są wypychane z cylindra przez tłok wykonujący suw wylotu. Ilość opuszczających cylinder w tym okresie spalin zależy od prędkości tłoka oraz przekroju przelotowego przez zawór wylotowy. Zbyt duża prędkość obrotowa silnika, od której zależy prędkość tłoka, nie jest korzystna, bowiem powoduje wzrost oporów przepływu spalin przez zawór i układ wylotowy.

Trzeci okres wylotu spalin przypada na końcową część procesu, kiedy ustaje działanie wypychające tłoka, a spaliny wypływają z cylindra w wyniku występującej jeszcze różnicy ciśnień w cylindrze i przewodzie wylotowym oraz pod wpływem bezwładności wypływającego strumienia spalin.

Proces wylotu nie zapewnia całkowitego usunięcia spalin z cylindra, dlatego też przy procesie napełniania brana jest pod uwagę reszta spalin. Skuteczność procesu wylotu określa **współczynnik reszty spalin**, który jest stosunkiem masy spalin pozostałych w komorze spalania po zakończeniu procesu wylotu do masy świeżego ładunku

$$\chi = \frac{m_{sp}}{m_f} \quad (1.9)$$

gdzie:

m_{sp} – masa spalin pozostałych w komorze spalania po zakończeniu procesu wylotu,

m_f – masa świeżego ładunku.

Średnia wartość współczynnika reszty spalin $\chi = 0,02 \dots 0,06$.

1.8. Pytania kontrolne i zadania

Pytania kontrolne

1. Na jakiej zasadzie działa tłokowy silnik spalinowy?
2. Jakie są zalety i wady tłokowego silnika spalinowego?
3. Jakie różnice występują w zasadzie działania silników ZI oraz ZS?
4. Z jakich układów konstrukcyjnych jest zbudowany tłokowy silnik spalinowy?
5. Co to jest stopień sprężania? Jakie wartości stopnia sprężania spotyka się we współczesnych silnikach tłokowych?
6. Jak przebiega cykl pracy silnika czterosuwowego?
7. Jakie założenia upraszczające przyjęto przy tworzeniu obiegów teoretycznych?
8. Jak jest zbudowany zamknięty wykres indykatorowy?
9. Co to są fazy rozrządu i w jaki sposób się je wyznacza?
10. Jakie korzyści wynikają z wcześniejszego otwierania i późniejszego zamykania zaworów względem skrajnych położenia tłoka?
11. Jak brzmi definicja współczynnika napełnienia cylindra?
12. Jaki jest wpływ czynników eksploatacyjnych na stopień napełnienia cylindra silnika?
13. Na czym polega doładowanie silnika i w jakim celu się je stosuje?
14. Jakie znasz sposoby zwiększania ciśnienia świeżego ładunku w czasie doładowania silnika?
15. Jakie są etapy procesu wylotu spalin z cylindra?

Zadania

1. Oblicz stopień sprężania oraz objętość skokową czterocyndrowego silnika o skoku tłoka $S = 90$ mm i średnicy cylindra $D = 80$ mm, którego objętość komory sprężania wynosi 50 cm³.

Rozwiązanie

$$S = 90 \text{ mm} = 9 \text{ cm}$$

$$D = 80 \text{ mm} = 8 \text{ cm}$$

$$V_K = 50 \text{ cm}^3$$

$$i = 4$$

Na podstawie wzorów (1.2) i (1.3) obliczamy objętość skokową cylindra (V_S), a następnie objętość skokową silnika (V_{SS})

$$V_S = \frac{\pi D^2}{4} S$$

$$V_S = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} \cdot 9 = 452,16 \text{ cm}^3 \approx 452 \text{ cm}^3$$

$$V_{SS} = V_S i$$

$$V_{SS} = 452 \cdot 4 = 1808 \text{ cm}^3$$

Stosując wzór (1.5), obliczamy stopień sprężania

$$\varepsilon = 1 + \frac{V_S}{V_K}$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{452}{50} = 1 + 9,04 = 10,04 \approx 10$$

Odpowiedź: objętość skokowa silnika wynosi 1808 cm³, a jego stopień sprężania jest równy 10 .

2. Oblicz, ile wynosi objętość skokowa czterocyndrowego silnika o stopniu sprężania równym 11 , jeżeli objętość komory sprężania cylindra tego silnika wynosi 40 cm³.

Odpowiedź: 1600 cm³.

3. Oblicz, jaką długość ma skok tłoka silnika o stopniu sprężania równym 19 i polu przekroju poprzecznego cylindra 45 cm², jeżeli objętość komory sprężania w tym silniku wynosi 20 cm³.

Odpowiedź: 80 mm.

2. Proces spalania w silnikach

2.1. Paliwa silnikowe

Paliwa stosowane do zasilania silników spalinowych wykorzystywanych do napędu pojazdów samochodowych, ze względu na źródła ich pozyskiwania, dzieli się na:

- paliwa konwencjonalne, do których zalicza się benzyny silnikowe i olej napędowy,
- paliwa alternatywne.

2.1.1. Benzyny silnikowe

Benzyna silnikowa jest mieszaniną ciekłych węglowodorów o temperaturze wrzenia 30...215°C uzyskiwanych w wyniku przeróbki ropy naftowej. Jest to paliwo powszechnie stosowane do zasilania silników o zapłonie iskrowym.

Benzyna silnikowa powinna charakteryzować się:

- odpowiednią lotnością, aby zapewnić prawidłowe tworzenie mieszanki paliwowo-powietrznej,
- dobrymi właściwościami przeciwstukowymi w celu zapewnienia prawidłowego i efektywnego spalania,
- właściwościami związanymi z ochroną środowiska, tak aby benzyna nie wpływała negatywnie bezpośrednio lub pośrednio na środowisko naturalne,
- innymi właściwościami mającymi wpływ na eksploatację i magazynowanie paliwa.

Poprawę właściwości benzyn uzyskuje się, wprowadzając do nich specjalne dodatki, do których zalicza się m.in.:

- inhibitory utleniania zapobiegające i hamujące proces starzenia benzyny,
- inhibitory korozji chroniące metale przed korozją,
- detergenty zmniejszające zanieczyszczenie osadami układu zasilania i dolotowego oraz komór spalania,
- deemulgatory zapobiegające tworzeniu stabilnej emulsji wody z benzyną.

Ponadto, w celu poprawy właściwości benzyn, do bazy węglowodorowej dodaje się organiczne związki tlenowe, np. alkohole, etery.