

ANALIZA WYBRANYCH PARAMETRÓW OKREŚLAJĄCYCH PRZEPIY W ŁADUNKU W SILNIKU SPALINOWYM

MIROŚLAW WĘCŁAŚ (POZNAŃ)

W pracy zwrócono szczególną uwagę na rolę mechaniki ładunku w procesach tworzenia mieszanki i spalania, realizowanych w silnikach spalinowych. Opisano podstawowe parametry charakteryzujące właściwości przepływowe układów dolotowych silników spalinowych. Zaproponowano empiryczną zależność opisującą współczynnik napełnienia cylindra w funkcji parametrów geometrycznych układu, prędkości obrotowej i współczynnika przepływu. Wyznaczono optymalne wartości parametrów geometrycznych i przepływowych układu zapewniających uzyskanie maksymalnego współczynnika napełnienia, dla rodziny niedoładowanych wysokoprężnych silników spalinowych. Zasygnalizowano główne problemy badawcze związane z procesami tworzenia mieszanki i jej spalania. Zwrócono uwagę na konieczność poszukiwania nowych technik pomiarowych, ze szczególnym uwzględnieniem metod laserowych.

1. WSTĘP

Mechanika ruchu ładunku w silniku spalinowym w istotny sposób wpływa na parametry pracy silnika oraz na emisję toksycznych substancji ze spalinami. Z punktu widzenia warunków pracy silnika spalinowego istotne są: przepływ ładunku w kanale dolotowym, przepływ przez zawór, zawirowanie typu SWIRL generowane przez kanał dolotowy w czasie napełniania cylindra oraz zawirowanie typu SQUISH jako wyzniki oddziaływania geometrii komory spalania w czasie suwu sprężania. Czynniki te odgrywają główną rolę w procesach tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej i jej spalania. Niestety, mimo wieloletnich badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych na świecie nad problemami mechaniki ładunku w silniku spalinowym, jak dotąd nie udało

się w pełni poznać charakteru ich przebiegu oraz wpływu na parametry pracy silnika. Problemy przepływu ładunku w silniku spalinowym badane były już w latach dwudziestych i trzydziestych. Do ważniejszych badań można zaliczyć prace CLERKA [1], TANAKI [2], RICARDO [3], ALCOCKA [4], LEE [5] oraz ROTHROCKA i SPENCERA [6]. Nieco później, interesujące prace badawcze nad przepływem ładunku w układach dolotowych i cylindrach silników spalinowych prowadzili: WOOD i inni [7], LIST i in. [8,9,10], PISCHINGER [11], MEURER [12], REISACHER [13] oraz THIEN [14].

Główna rola ruchu ładunku w silniku spalinowym polega na kształtowaniu warunków tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz wpływie na przebieg procesu spalania poprzez mikro- i makro-skale mieszania (szczególnie istotna jest tu turbulencja).

Przepływ ładunku w kanałach dolotowych i cylindrze, zarówno dla silników ZI jak i silników ZS, jest ściśle związany z parametrami konstrukcyjnymi silnika: konstrukcją i geometrią kanału dolotowego wraz z zaworem, geometrią komory spalania, lokalizacją świecy zapłonowej w komorze spalania i charakterystyką wtrysku paliwa.

Zasadnicza rola układu dolotowego silnika (poza doprowadzeniem do cylindra masy ładunku) polega na generowaniu złożonego ruchu ładunku (zawirowanie) oraz intensywności i skali turbulencji mieszanki w cylindrze silnika. Ze względu na warunki tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej, szczególnie istotne są te procesy w odniesieniu do szybkoobrotowych silników wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim.

Ogólnie, znany jest istotny wpływ konstrukcji kanału dolotowego na parametry pracy silnika spalinowego lecz w dużo mniejszym stopniu poznana jest struktura przepływu ładunku w cylindrze silnika generowanego przez różne typy kanałów dolotów.

2. PARAMETRY OKREŚLAJĄCE WŁAŚCIWOŚCI PRZEPLYWOWE UKŁADÓW DOLOTOWYCH

Do podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości przepływowe układów dolotowych silników spalinowych można zaliczyć (w analizie tej autor szczególną uwagę zwrócił na silniki wysokoprężne): średnie prędkości przepływu powietrza w układzie dolotowym V , współczynnik przepływu C_D , współczynnik przepływu C_F , parametr Macha

Z , współczynnik napełnienia cylindra η_v , stopień zawirowania R_z , współczynnik zawirowania η_z , turbulencja przepływu, wielomodowość przepływu przez zawór.

Dodatkowo, z punktu widzenia konstrukcji układu, ważne miejsce zajmują następujące bezwymiarowe parametry geometryczne: D_k/D - stosunek średnicy kanału dolotowego (gniazda zaworu) D_k do średnicy cylindra D , S/D - stosunek skoku tłoka S do średnicy cylindra D , l - parametr długości kanału dolotowego

$$l = (L_k \cdot D_k) / (D \cdot S),$$

gdzie L_k jest rzeczywistą długością kanału dolotowego. Średnia prędkość przepływu ładunku w układzie dolotowym silnika jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na przepływ ładunku w silniku spalinowym. Prędkość ta może być mierzona zarówno w silniku pracującym ze spalaniem, jak i z obcym napędem lub w modelu silnika przy użyciu anemometru laserowego LDA⁽¹⁾. Oszacowanie dopuszczalnego zakresu średnich prędkości przepływu ładunku w rozpatrywanej grupie silników jest pierwszym krokiem w optymalizacji parametrów geometrycznych układu.

Jednym z podstawowych parametrów określających właściwości przepływowe kanału dolotowego wraz z zaworem jest współczynnik wypływu C_D . Współczynnik wypływu C_D dla kanału osiowosymetrycznego został wyznaczony przez TINALDA, CHEUNGA i YIANNESKISA [16] na podstawie rozważań przeprowadzonych przez ANNADA i ROE'A [17], w następującej postaci

$$(2.1) \quad C_D = \frac{\dot{m}(2 \cdot \rho \Delta p)^{-0.5}}{\pi \cdot D_k \cdot L},$$

przy czym zależność ta jest słuszna dla małych spadków ciśnienia w kanale. We wzorze (2.1) \dot{m} oznacza masowe natężenie przepływu powietrza liczone na podstawie prędkości średniej, ρ - gęstość powietrza, Δp - spadek ciśnienia w kanale dolotowym, D_k - średnicę gniazda zaworu dolotowego, a L - wznios zaworu.

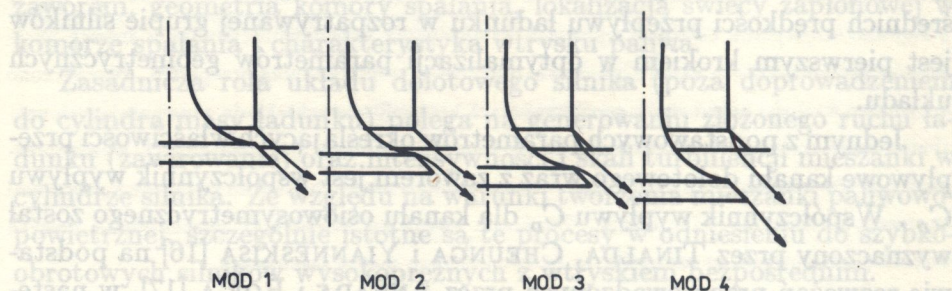
Znacznie wcześniej TANAKA [2] oraz WOOD i inni [7] wykazali, że wpływ z kanału dolotowego (współczynnik wypływu) jest nieciągłą funk-

⁽¹⁾Zastosowanie anemometrii laserowej LDA w badaniach silników spalinowych autor szczególnie opisał w pracy [15]

cją skoku zaworu. Nieciągłości te są związane z występowaniem wielomodowości przepływu przez zawór dolotowy w funkcji jego skoku⁽²⁾.

Zgodnie z wynikami badań [16,17] dla kanału osiowosymetrycznego, współczynnik wypływu C_D jest niezależny od spadku ciśnienia Δp w kanale dla wyższych wartości liczby Reynoldsa. Natomiast dla niższych skoków zaworu, to jest dla niższych wartości liczby Re , zmiana w wartościach współczynnika C_D w funkcji spadku ciśnienia Δp jest około trzykrotnie wyższa niż dla wyższych skoków zaworu. Współczynnik wypływu C_D osiąga wyższe wartości dla przepływów bez zawirowania niż w przepływach z generacją zawirowania typu SWIRL.

Zagadnienie wielomodowości przepływu przez zawór nie zostało jak dotąd w pełni poznane i opisane. Większość autorów jednak skłania się do poglądu, iż w przepływie powietrza przez szczelinę zaworu dolotowego istnieją cztery mody przepływu będące funkcją wzniosu zaworu. Schemat takiego czteromodowego przepływu przez zawór za ARCOUMANISEM i WHITELAWEM [18] przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat czteromodowego przepływu przez zawór

Na podstawie badań YIANNESKISA, TINDALA i SUENA [19], poszczególne mody przepływu dla kanału osiowosymetrycznego można scharakteryzować w sposób następujący. Dla wzniosu zaworu $L = 2\text{mm}$ przepływ zostaje "przywiązany" zarówno do gniazda jak i zaworu MOD-1. Obszar ten odpowiada maksymalnym wartościom współczynnika wypływu C_D . Gdy wznios zaworu wzrasta do wartości $L = 3,35\text{mm}$ struga odrywa się od powierzchni grzybka zaworu MOD-2. Dla wyższych wzniosów zaworu $L = 6,7\text{mm}$ przepływ odrywa się zarówno od gniazda jak i przyłgni grzybka zaworu MOD-3. Dla tego modu, strumień

⁽²⁾Modami przepływu nazwano charakter przepływu powietrza w szczelinie zaworu zależny od wzniosu zaworu

wypływający przez szczelinę zaworu zachowuje się jak struga swobodna. Dla maksymalnych wzniosów zaworu $L = 12\text{mm}$ obserwuje się dalszy spadek współczynnika wypływu C_D , przy czym jego przebieg zbliża się do asymptoty MOD-4. Na przebieg współczynnika wypływu C_D duży wpływ mają parametry geometryczne układu, takie jak szerokość gniazda czy promień zaokrąglenia.

Jak już zasygnalizowano wyżej, problem wielomodowości przepływu przez zawór badany był przez wielu autorów⁽³⁾, ale jak dotąd brak jednomyślności na ten temat wśród badaczy. Na przykład, ARCOUMANIS i WHITELAW oraz YIANNESKIS, TINDAL i SUEN opisują występowanie czterech modów przepływu. Natomiast ANNAD i ROE wykazali istnienie tylko dwóch modów w przepływie czynnika przez zawór dolotowy silnika. Osobnym problemem jest tu wpływ obszarów recyrkulacji w okolicy gniazda zaworu na przebieg współczynnika wypływu C_D oraz oddzielenie wypływu tych obszarów od modów przepływu. Wynika z tego, że liczba modów przepływu nie musi odpowiadać liczbie nieciągłości przebiegu współczynnika wypływu gdyż ze wzrostem szerokości gniazda zaworu obszar oderwania przepływu może rosnąć dalej i bardziej oddziaływać na przebieg współczynnika C_D . Dlatego też, bardziej uniwersalnym parametrem do badań modów przepływu przez zawór wydaje się być masowe natężenie przepływu \dot{m} lub współczynnik napełnienia η_v , który jest funkcją współczynnika przepływu C_F , co zostanie przedstawione w dalszej części pracy.

Współczynnik przepływu C_F , zdefiniowany przez PARTINGTONA [20], można napisać w postaci

$$(2.2) \quad C_F = \frac{\dot{Q}}{A \cdot V},$$

gdzie \dot{Q} jest objętościowym natężeniem przepływu w miejscu napływu czynnika, A – powierzchnia przekroju swobodnego przepływu gniazda zaworowego oraz V – średnią prędkością przepływu powietrza w przewodzie dolotowym. Inną definicję współczynnika przepływu C_F podał THIEN [21]

$$(2.3) \quad C_F = \frac{V}{\bar{V}},$$

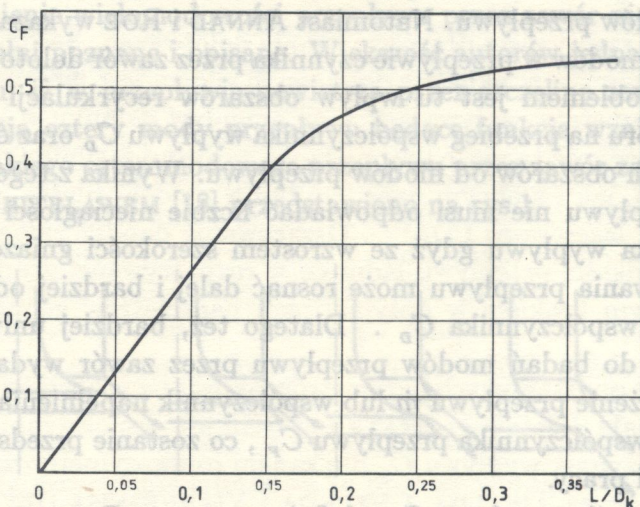
⁽³⁾Zjawisko wielomodowości przepływu przez zawór nie było zasadniczym celem badań. Badacze obserwowali to zjawisko podczas analizy przepływu ładunku w kanałach dolotowych.

gdzie \bar{V} jest średnią prędkością przepływu powietrza w przewodzie dolotowym odpowiadającą spadkowi ciśnienia Δp . Rzeczywisty przepływ masy może być napisany w następującej postaci:

$$(2.4) \quad \dot{m} = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S \cdot n \cdot \rho = \rho \cdot \dot{Q}.$$

Podstawiając wyrażenie (2.4) do (2.2) otrzymuje się

$$(2.5) \quad C_F = \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \frac{S \cdot n}{V},$$



Rys. 2. Przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji bezwymiarowego skoku zaworu

gdzie n jest prędkością obrotową wału korbowego silnika s^{-1} . Przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji bezwymiarowego skoku zaworu, zgodnie z badaniami GALE'A [22], przedstawiono na rys.2. Do analizy współczynników przepływu szczególnie przydatne są układy o ustalonych warunkach przepływu ze względu na eliminację wpływu ruchu tłoka na warunki przepływu, zmian cyklicznych w przepływie oraz eliminację fal ciśnienia w kanale dolotowym.

HAGHOOIE, KENT i TABACZYNSKI [23] pokazali, że wszystkie procesy przepływowe realizowane w silniku spalinowym są nieodłącznie zależne od czasu, przy czym można założyć, że przepływ przez zawór jest quasi-ustalony. Przepływ nie ustalony w każdej chwili czasu jest w przybliżeniu taki sam jak przepływ ustalony, odpowiadający chwilowemu

wzniosowi zaworu i spadkowi ciśnienia w kanale. Należy tu zaznaczyć, że przebieg współczynnika przepływu C_F jest zależny nie tylko od wzniosu zaworu, ale również od parametrów geometrycznych układu.

DAVIS i TABACZYNSKI [24] zaproponowali wyrażenie opisujące przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji wzniosu zaworu L w postaci

$$(2.6) \quad C_F(L) = \frac{4 \cdot A_{\text{eff}}}{\pi \cdot D_K^2},$$

gdzie A_{eff} jest czynną powierzchnią przepływu przez zawór liczoną jako funkcja skoku zaworu L . $C_F(L)$ jest normalnie mierzony na podstawie całkowitego spadku ciśnienia w kanale dolotowym silnika. DAVIS i TABACZYNSKI zaproponowali wyznaczenie lokalnych współczynników przepływu na podstawie pomiaru odpowiednich lokalnych spadków ciśnień.

Współczynnik przepływu C_F jest ściśle związany ze współczynnikiem napełnienia η_v , co zostanie pokazane niżej. Zagadnienie to szczegółowo analizowali WŁAD i WĘCLAŚ [25], również z uwzględnieniem wpływu różnych parametrów geometrycznych (D_k , D , S). W celu przedstawienia tych rozważań dogodne będzie wprowadzenie do niniejszej analizy parametru Macha Z , definiowanego jako stosunek podwójnej wartości prędkości średniej na dolocie V do prędkości dźwięku w przewodzie a dla położenia tłoka w ZZ

$$(2.7) \quad Z = \frac{2 \cdot V}{a}.$$

Wartość prędkości dźwięku a według badań Ricardo wynosi 343,2 m/s. Biorąc pod uwagę zależności (2.5) i (2.7) można otrzymać następujące wyrażenie opisujące parametr Z :

$$(2.8) \quad Z = \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \frac{2 \cdot S \cdot n}{a \cdot C_F}.$$

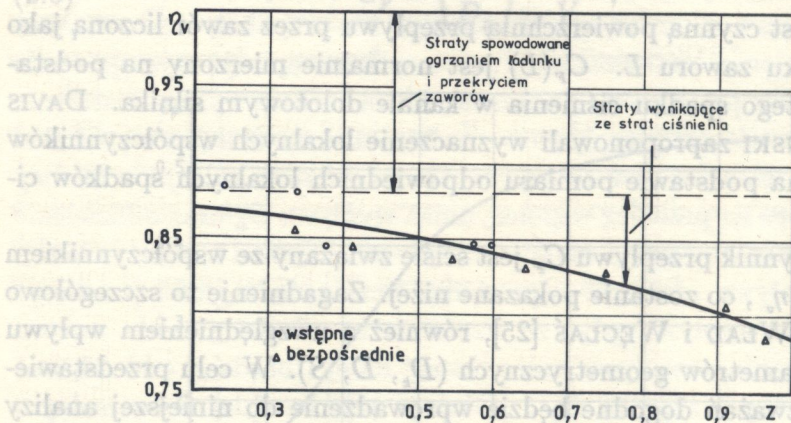
Podobne wyrażenie, jako parametr Macha, podał TAYLOR [26] w postaci

$$(2.9) \quad Z = \left(\frac{D}{D_K} \right) \frac{S \cdot n \cdot A}{\mu \cdot f \cdot a},$$

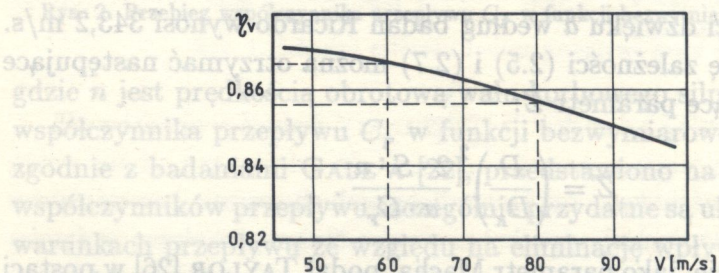
gdzie A jest powierzchnią przekroju swobodnego przepływu gniazda zaworowego, μ jest współczynnikiem przepływu przez zawór oraz f jest rzeczywistym polem przepływu przez szczelinę zaworu. Parametr Z

jest ściśle związany ze współczynnikiem napętnienia η_v . Uniwersalną zależność $\eta_v = f(Z)$ dla rodziny⁽⁴⁾ wysokoprężnych silników spalinyowych za GREVESEM, WANGIEM i KYRIAZISEM [27] przedstawiono na rys.3. Biorąc pod uwagę krzywą eksperymentalną, WŁAD i WĘCLAŚ [25] zaproponowali przebieg współczynnika napętnienia η_v w postaci

$$(2.10) \quad \eta_v = 0,88(1 - 0,119Z^2).$$



Rys. 3. Przebieg współczynnika napętnienia η_v w funkcji parametru Z dla rodziny szybkoobrotowych silników wysokoprężnych



Rys. 4. Przebieg współczynnika napętnienia η_v w funkcji średniej prędkości przepływu ładunku w układzie dolotowym silnika

Wartość 0,88 jest przyjęta jako względnie stała wartość dla rodziny badanych silników wysokoprężnych, niedoładowanych, chłodzonych cieczą

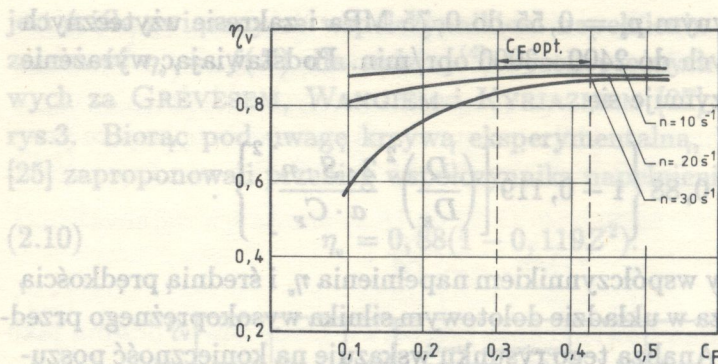
⁽⁴⁾Pod uwagę wzięto szybkoobrotowe silniki wysokoprężne z wtryskiem bezpośrednim

o ciśnieniu efektywnym $p_e = 0,55$ do $0,75$ MPa i zakresie użytecznych prędkości obrotowych do 2400 - 3000 obr/min. Podstawiając wyrażenie (2.9) do (2.10) otrzymuje się

$$(2.11) \quad \eta_v = 0,88 \left\{ 1 - 0,119 \left[\left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \frac{2 \cdot S \cdot n}{a \cdot C_F} \right]^2 \right\}.$$

Zależność pomiędzy współczynnikiem napełnienia η_v i średnią prędkością przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika wysokoprężnego przedstawiono na rys.4. Analiza tego rysunku wskazuje na konieczność poszukiwania optymalnego zakresu prędkości przepływu powietrza w kanale dolotowym, ze względu na zachowanie możliwie maksymalnego współczynnika napełnienia η_v . Średnia prędkość przepływu powietrza w układzie dolotowym ograniczona jest z jednej strony ograniczeniem maksymalnej wartości parametru Z . Parametr ten, ze względu na zachowanie poddźwiękowych prędkości przepływu w układzie dolotowym nie powinien przekraczać wartości $Z = 0,6$, co ogranicza maksymalne wartości średnich prędkości przepływu V poniżej 100 m/s. Z drugiej strony, wartości V ograniczone są spadkiem wartości współczynnika napełnienia η_v . Jednakże spadek wartości średniej prędkości przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika powoduje spadek stopnia zawirowania ładunku w cylindrze, co z kolei wiąże się ze wzrostem stopnia zadymienia spalin oraz zużycia paliwa przez silnik. Dlatego też, trudnym zadaniem jest określenie optymalnego zakresu średniej prędkości przepływu w układzie dolotowym, przy zachowaniu możliwie dużego stopnia napełnienia cylindra.

Na rys.5 przedstawiono zależność współczynnika napełnienia od współczynnika przepływu C_F dla różnych wartości prędkości obrotowych n wału korbowego silnika. Analiza krzywych przedstawionych na rys.5 prowadzi do następujących wniosków. Dla niskich wartości współczynnika przepływu C_F wartości współczynnika napełnienia η_v są silnie zależne od prędkości obrotowej wału korbowego silnika, a jednocześnie współczynnik napełnienia wykazuje tendencje spadkowe. W miarę wzrostu wartości C_F krzywe η_v dla różnych wartości prędkości obrotowej wału korbowego silnika zbliżają się do prawie stałego poziomu, przy czym różnice η_v dla różnych prędkości obrotowych n są niewielkie. Optymalny zakres wartości współczynnika przepływu C_F wynosi 0,3 do 0,43. Zakres ten pozwala na zachowanie przebiegu współczynnika napełnienia

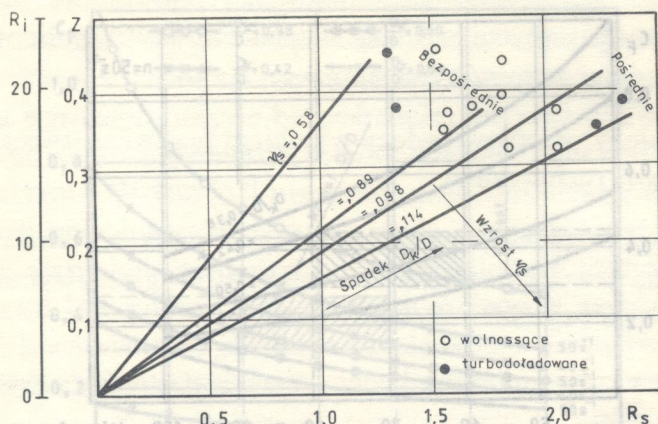
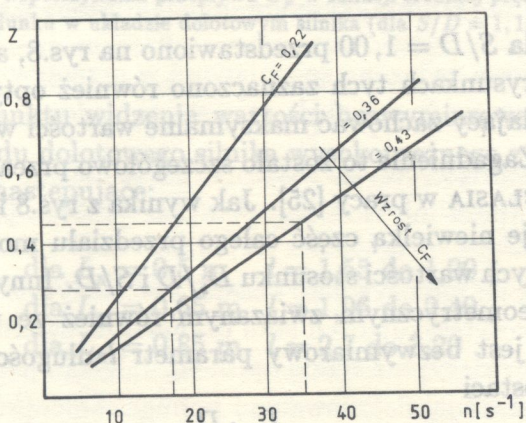


Rys. 5. Zależność współczynnika napelnienia η_v w funkcji współczynnika przepływu C_F dla różnych prędkości obrotowych wału korbowego silnika

η_v na poziomie 0,857 do 0,867, co z kolei odpowiada zakresowi średniej prędkości przepływu powietrza w układzie dolotowym silnika $V = 60$ do 80 m/s , (rys.4). Parametr Z związany jest nie tylko ze współczynnikiem przepływu C_F (lub współczynnikiem napelnienia η_v), ale również ze stopniem zawirowania ładunku R_i w cylindrze silnika.

Stopień zawirowania ładunku jest jednym z podstawowych parametrów określających zdolność układu dolotowego do nadania ruchu obrotowego strumieniowi przepływającego powietrza, co jest szczególnie istotne z punktu widzenia warunków tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku wysokoprężnym o bezpośrednim wtrysku paliwa do komory umieszczonej w tłoku.

Zgodnie z wynikami badań GREEVES, WANGA i KYRIAZISA [27] oraz THIENA [28], na rys.6 przedstawiono zależność pomiędzy parametrem Z , stopniem zawirowania R_i oraz stopniem średniej prędkości przepływu w układzie dolotowym silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim R_i . R_i zdefiniowano jako stosunek średniej prędkości przepływu powietrza w układzie dolotowym do średniej prędkości tłoka, a stopień zawirowania R_i jest stosunkiem prędkości kątovej ładunku w cylindrze w końcu suwu dolotu do prędkości obrotowej wału korbowego silnika. Przedstawione na rys.6 zależności odpowiadają średniej prędkości tłoka równej 7 m/s . Właściwości przepływowe kanału dolotowego mogą być opisane za pomocą współczynnika przepływu C_F wyrażonego w funkcji

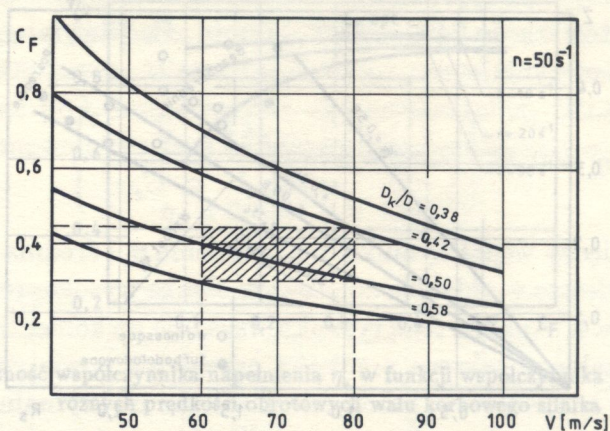
Rys. 6. Zależność parametru Z , R_i od stopnia zawirowania ładunku R_s .Rys. 7. Zależność parametru Z od prędkości obrotowej wału korbowego silnika dla różnych wartości współczynnika przepływu C_F .

parametru Z

$$(2.12) \quad C_F = \left(\frac{D}{D_K} \right)^2 \frac{2 \cdot S \cdot n}{a \cdot Z}$$

Zależność tę, w funkcji prędkości obrotowej wału korbowego silnika przedstawiono na rys.7.

Bardzo interesujący jest przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji średniej prędkości przepływu ładunku w kanale dlotowym dla różnych wartości stosunku średnicy kanału D_k do średnicy cylindra D .



Rys. 8. Przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji średniej prędkości przepływu łańku w układzie dolotowym silnika (dla $S/D = 1,00$)

Zależność tę dla $S/D = 1,00$ przedstawiono na rys.8, a dla $S/D = 1,15$ na rys.9. Na rysunkach tych zaznaczono również optymalny przedział $C_F - V$ pozwalający zachować maksymalne wartości współczynnika napelnienia η_n . Zagadnienie to zostało szczegółowo przeanalizowane przez WŁADA i WĘCLAŚIA w pracy [25]. Jak wynika z rys.8 i rys.9 optymalny zakres obejmuje niewielką część całego przedziału możliwych wartości $C_F - V$ dla różnych wartości stosunku D_k/D i S/D . Innym interesującym parametrem geometrycznym związanym również ze współczynnikiem przepływu C_F jest bezwymiarowy parametr l długości kanału dolotowego L_k , w postaci

$$(2.13) \quad l = \frac{L_k \cdot D_k}{D \cdot S}.$$

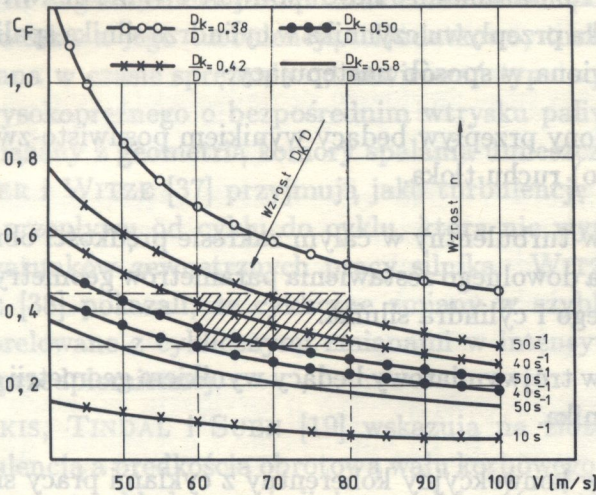
Parametr ten, zgodnie z tym co zasygnalizowano wyżej, może być wyrażony w funkcji współczynnika przepływu C_F

$$(2.14) \quad l = L_k \left[\frac{n}{V \cdot S \cdot C_F} \right]^{0,5}$$

lub chcąc wyrazić bezpośrednio współczynnik przepływu

$$(2.15) \quad C_F = \left(\frac{L_k}{l} \right)^2 \frac{n}{V \cdot S}.$$

Biorąc pod uwagę powyższe założenia o poszukiwaniu warunków dla zachowania maksymalnej wartości współczynnika napelnienia η_n , opty-



Rys. 9. Przebieg współczynnika przepływu C_F w funkcji średniej prędkości przepływu ładunku w układzie dolotowym silnika (dla $S/D = 1,15$)

malne z tego punktu widzenia wartości bezwymiarowego parametru l długości przewodu dolotowego silnika wysokoprężnego z wtryskiem bezpośrednim jest następujące:

- dla $L_K = 0,5 \text{ m}$ $l = 1,55 \text{ do } 1,90$,
- dla $L_K = 0,65 \text{ m}$ $l = 1,96 \text{ do } 2,40$,
- dla $L_K = 0,85 \text{ m}$ $l = 2,7 \text{ do } 3,20$.

3. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW RUCHU ŁADUNKU W CYLINDRZE SILNIKA SPALINOWEGO

Rola ruchu ładunku w cylindrze silnika spalinowego i turbulencja przepływu w procesach tworzenia mieszanki paliwo-powietrznej i spalania oraz ich wpływ na parametry pracy silnika i emisję składników toksycznych badane były przez wielu badaczy, ale jak dotąd brak jest jednoznacznego opisu tych zjawisk. Do ważniejszych prac badawczych można zaliczyć prace ARCOUMANISA i WHITELAWA [18], TINDALA, CHEUNGA i YIANNESKISA [16], KENTA i innych [29], SAXENA i RASKA [30], WITZE i MENDES-LOPESA [31].

Zgodnie z rozważaniami ARCOUMANISA i WHITELAWA [18], ogólna charakterystyka przepływu czynnika w cylindrze silnika spalinowego może być przedstawiona w sposób następujący:

1. Nieustalony przepływ będący wynikiem posuwisto-zwrotnego (cyklicznego) ruchu tłoka.
2. Przepływ turbulentny w całym zakresie prędkości obrotowych silnika i dla dowolnego zestawienia parametrów geometrycznych kanału dolotowego i cylindra silnika.
3. Przepływ trójwymiarowy będący wynikiem geometrii systemu spalania silnika.
4. Przepływ konwekcyjny koherentny z cyklami pracy silnika.
5. Zmiany w przepływie od cyklu do cyklu pracy silnika.
6. Skala czasowa związana ze zmianami w przepływie konwekcyjnym tego samego rzędu jak skala czasowa turbulencji.

Powyższa charakterystyka wskazuje na to, iż nie można opisywać klasycznymi teoriami tak złożonego, stochastycznego przepływu turbulentnego.

Turbulencja, jej intensywność i skala, jest jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących stan czynnika w cylindrze silnika. Niestety, odrzucając klasyczne teorie opisu turbulencji, jednym z głównych problemów staje się jej definiowanie i pomiar. Dodatkowo, turbulencja jest parametrem istotnie wpływającym na proces spalania, a szczególnie na strukturę płomienia w komorze spalania silnika. W chwili obecnej turbulencja w silniku spalinowym mierzona jest najczęściej przy użyciu anemometrii laserowej LDA. Fakt ten spowodował nowe problemy związane z analizą sygnałów LDA i interpretacją turbulencji. Wielu badaczy zajmowało się badaniem turbulencji przepływu ładunku w cylindrze silnika spalinowego. Ze względu na cykliczność pracy silnika i ruch tłoka szczególnie przydatne okazały się układy modelowe silników spalinowych. Interesujące prace w zakresie poznania wpływu parametrów silnika na turbulencję przepływu i jej strukturę (w obecności i bez zawirowania) prowadzili między innymi LANCASTER [32], WITZE [33], WAKISAKA i inni [34], TABACZYNSKI [35] oraz MONAGHAN i PETTIFER

[36]. Istotnym zagadnieniem jest poznanie zależności pomiędzy zawirowaniem ładunku a jego turbulencją. Dodatkowo, turbulencja może być generowana w czasie sprężania od zawirowań typu squish w komorze silnika wysokoprężnego o bezpośrednim wtrysku paliwa. Efekt ten jest ściśle związany z geometrią komory spalania umieszczonej w denku tłoka. FOSTER i WITZE [37] przyjmują jako turbulencję każdą zmianę w prędkości przepływu od cyklu do cyklu, która nie wynika ze zmian przyjętych warunków zewnętrznych pracy silnika. WITZE, MARTIN i BORGNACKE [38] pokazali, że cykliczne zmiany w szybkości spalania mogą być korelowane z cyklicznymi zmianami w intensywności turbulencji strefy przedpłomiennej.

YIANNESKIS, TINDAL i SUEN [19] wskazują na złożoną zależność między turbulencją a prędkością obrotową wału korbowego silnika. Wielu badaczy natomiast zakłada prawie liniową zależność między tymi parametrami. Duże trudności w definiowaniu i pomiarach turbulencji przepływającego ładunku w silniku spalinowym związane są również z faktem, iż występują duże zmiany w pomiarach prędkości dla tego samego punktu pomiarowego, ale dla różnych cykli pracy silnika.

KAMIMOTO i KOBAYASHI [39] wskazują na konieczność odróżnienia zmian cyklicznych przepływu w komorze spalania od turbulencji. Z kolei ARCOUMANIS i WHITELAW [18] zwracają szczególną uwagę na konieczność separacji przepływu uśrednionego od turbulencji, co jest ściśle związane z jej definiowaniem.

Innym ważnym zagadnieniem związanym z przepływem czynnika w cylindrze silnika spalinowego jest zawirowanie ładunku, lokalizacja centrum "SWIRL", jego rodzaj i intensywność. Analiza tego problemu jest bardzo trudna i przekracza ramy niniejszej pracy. Dlatego też, autor zwrócił uwagę na wybrane problemy dotyczące zawirowania ładunku w cylindrze silnika. Podstawowy problem stanowi interpretacja ruchu wirowego jako ruchu obrotowego bryły sztywnej. Taki bowiem model zawirowania generowanego przez układ dolotowy w czasie napełniania cylindra jest ogólnie stosowany przez badaczy, mimo iż w odniesieniu do warunków silnikowych model ten jest (poza obszarem niskich prędkości obrotowych) wysoce niezadowolający. Taki model zawirowania stosowali różni badacze, między innymi MATSUHITA i inni [40], BRANDSTATTER, JOHNS i WIGLEY [41], BALL, PETTIFER i WATERHOUSE [42], ARCOUMANIS i WHITELAW [18] oraz SINNAMON, LANCASTER i STEINER [43].

Problem możliwości zastosowania modelu bryły sztywnej do opisu zawirowania ładunku w cylindrze silnika był szczegółowo analizowany i eksperymentalnie weryfikowany przez WIGLEY'A i RENSHAWA [44]. Autorzy ci wykazali, że dla wyższych prędkości obrotowych wału korbowego silnika zastosowanie modelu bryły sztywnej do opisu zawirowania ładunku jest niedopuszczalne. Trudne jest natomiast w chwili obecnej określenie granicy prędkości obrotowej, do której model taki może być użyty. Ogólnie można jednak przyjąć poprawność modelu bryły sztywnej dla prędkości obrotowych wału silnika poniżej 1000 obr/min. Osobnym problemem jest tu interpretacja zawirowania typu squish generowanego w czasie suwu sprężania (od geometrii komory spalania).

SUZUKI i SHIOZAKI [45] pokazali, że dla określonego stopnia zawirowania ładunku w cylindrze silnika musi być dobrana charakterystyka wtrysku paliwa.

Jak już wspomniano wyżej, przepływ ładunku w cylindrze silnika spalinowego ma ogromne znaczenie w kształtowaniu warunków tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej i jej spalaniu. Dlatego też, parametry przepływowe muszą być rozpatrywane w powiązaniu z procesem wtrysku paliwa, parametrami płomienia, wydzielaniem ciepła oraz koncentracją temperatury w komorze spalania silnika spalinowego. Opisanie tych wszystkich procesów przekracza ramy tej pracy. Można jednak zasygnalizować główne problemy badawcze związane z wyżej wymienionymi czynnikami. Do podstawowych problemów badawczych obejmujących zagadnienia przepływu ładunku, tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej i spalania w silniku spalinowym można zaliczyć:

1. Eksperymentalne wyznaczanie pól przepływów w rzeczywistym silniku spalinowym oraz separację przepływów konwekcyjnego i turbulentnego.
2. Badania przepływu w kanałach dolotowych i szczelinie zaworu dolotowego oraz zależność zmian "cycle-by-cycle" przepływu w cylindrze silnika.
3. Badanie przepływów dwufazowych "ciecz-gaz" w kanałach dolotowych dla chwilowych warunków przepływu.
4. Badania mechaniki ruchu ładunku.

5. Wpływ geometrii kanału dolotowego na zjawisko rozwoju przepływu w kanale dolotowym i zawirowanie ładunku w cylindrze silnika.
6. Badania wpływu wielomodowości przepływu przez zawór na współczynnik przepływu, wypływu i stopień napełnienia cylindra.
7. Wpływ nałożenia się zawirowań typu "swirl" i "squish" na rozwój, penetrację i rozpad strugi paliwa w komorze spalania silnika wysokoprężnego.
8. Badania zjawisk rozpadu i łączenia się kropeł.
9. Badania obszarów przepływu o wysokiej intensywności mieszania w strugach chwilowych i mechanizmu formowania się kropeł paliwa.
10. Badania zachowania się strug paliwa przy bardzo wysokich ciśnieniach wtrysku paliwa w warunkach wysokich temperatur i przeciwcisnień.
11. Badania mieszania turbulentnego w silnikach o ładunku niejednorodnym, a szczególnie mieszania gazów w różnych temperaturach.
12. Badania zjawiska parowania paliw wieloskładnikowych.
13. Badania struktury ustalonych i chwilowych strug paliwa w silnikach wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim, a szczególnie badania widm rozpylenia.
14. Interakcja "kropla paliwa-przepływ turbulentny" jako funkcja rozkładu wielkości kropeł i ich prędkości oraz jej wpływ na zjawisko parowania paliwa i mieszania z powietrzem.
15. Dobór charakterystyki wtrysku paliwa do uzyskanego w komorze spalania silnika stopnia zawirowania ładunku.
16. Mechanizm spalania cyklicznego w mieszankach turbulentnych.
17. Czynniki określające zapłon iskrowy.
18. Badania elementarnych reakcji paliwa w aspekcie spalania stukowego.

19. Zależność pomiędzy swobodną propagacją płomienia i mechaniką turbulencji ośrodka w komorze spalania silnika.
20. Mechanizm propagacji płomienia turbulentnego w mieszance dla warunków spalania stukowego.
21. Poznanie inicjacji i rozwoju płomienia w funkcji ruchu ładunku w komorze spalania silnika spalinowego.
22. Badania przebiegu spalania mieszanek bogatych w warunkach wysokich temperatur i ciśnień.
23. Badania wpływu struktury paliwa na formowanie się cząstek stałych zawieszonych w bogatych mieszankach gazowych w warunkach wysokich ciśnień i temperatur.
24. Badania wymiany ciepła w komorze spalania silnika.
25. Rozkład pola temperatur i składu chemicznego ośrodka w komorze spalania silnika w funkcji warunków przygotowania mieszanki paliwowo-powietrznej (szczególnie zawirowania).
26. Oddziaływanie czoła płomienia z warstwą przyścienną komory spalania.
27. Wpływ charakterystyki wtrysku paliwa na zadymienie i skład spalin jako funkcja zawirowania ładunku.
28. Tworzenie nowych technik pomiarowych (szczególnie metody laserowe).

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy zagadnienia dotyczące ruchu ładunku w cylindrze silnika i ich bezpośredni związek z problemami tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz jej spalaniem wymaga nowego spojrzenia na problem pomiaru tych parametrów, a co się z tym wiąże, konieczność stosowania nowych technik pomiarowych.

Obecnie najefektowniejszymi i najbardziej perspektywicznymi metodami pomiarowymi są techniki laserowe, które pozwalają mierzyć istotne parametry związane z procesami przepływowymi czynnika w silniku,

tworzenia mieszanki pełnej oraz jej spalaniem. Na szczególną uwagę zasługują tu takie metody jak: anemometria laserowa LDA, holografia laserowa, fotografia schlieren, metody spektroskopowe (rozpraszanie Ramana, CARS, BOXCARS, Rayleigha i Mie), wielowiązkowe systemy odbiciowe i wiązki penetracyjne⁽⁵⁾.

Wymienione wyżej metody laserowe pozwalają na pomiar określonego parametru. Można rozszerzyć możliwości pomiarowe tych metod poprzez ich łączenie w grupy tzw. laserowych metod połączonych, w których anemometrię laserową LDA uzupełnia się jedną lub kilkoma innymi metodami laserowymi. Takie systemy pomiarowe pozwalają mierzyć zagadnienia kompleksowe, np. wtrysk paliwa, strukturę strugi w powiązaniu z ruchem ładunku (patrz [46]).

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. D.CLERK, *Cylinder actions in gas and gasoline engines*, SAE J., 8, 1921.
2. K.TANAKA, *Air flow through suction valve of conical seat*, Aeronaut. Res. Report, part 1 and 2, Tokyo 1929.
3. H.R.RICARDO, *Combustion in Diesel engines*, P. Int. Auto Engrs., 24, 1930.
4. J.F.ALCOCK, *Air swirl in oil engines*, P. Int. Mech. Engrs., 123, 1934.
5. D.W.LEE, *A study of air flow in an engine cylinder*, NASA Report, 653, 1939.
6. A.M.ROTHROCK, R.C.SPENCER, *The influence of direct air flow on combustion in a spark ignition engine*, NASA Report, 657, 1939.
7. G.B.WOOD i inni, *Air flow through intake valves*, SAE Transl., 50, 50, 1942.
8. H.LIST, G.REYL, *Der Ladungswechsel der Verbrennungskraftmaschinen, part 1, Grundlagen. Die rechnerische Behandlung der Instationaren Stromungsvorgange am Motor*, Springer-Verlag, Wiedeń 1949.
9. H.LIST, *Der Ladungswechsel der Verbrennungskraftmaschine, part 3, Der Viertakt, Ausnutzung der Abgesenergie für den Ladungswechsel*, Springer-Verlag, Wiedeń 1952.
10. H.LIST et al., *Developing high speed direct injection Diesel engines*, SAE Paper, 978 B, Detroit 1965.
11. F.PISCHINGER, *Entwicklungsarbeiten an Einem Verbrennungssystem für Fahrzeug-Dieselmotoren*, ATZ, 1963.
12. S.MEURER, *Erzeugung von Drehbewagungen der Luft in den Zylindern Schnellaufender Viertakt Dieselmachines durch die Einlassorgane*, Man-Fors., 1951.

⁽⁵⁾Zagadnienia te autor szczegółowo opisał w pracy [46] oraz w pracach [47, 48].

13. J.REISACHER, *Stationäre Untersuchungen an Auslasskanalen*, MAN-Fors, 8, 1958.
14. G.THIEH, *Entwicklungsarbeiten an Ventilkkanalen von Viertakt - Dieselmotoren*, Osterreichische Ing. Zeitschrift, 9, 1965.
15. M.WĘCLAŚ, *Anemometria laserowa LDA w badaniach silników spalinowych*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, seria Rozpraw, 190, 1988.
16. M.J.TINDAL, R.S.CHEUNG, M.YIANNESKIS, *Velocity characteristics of steady flows through engine inlet port and cylinders*, SAE Paper, 880383, 1988.
17. W.J.D.ANNAD, G.E.ROE, *Gas flow in the internal combustion engine*, Foulis, Yeovil, 1974.
18. C.ARCOUMANIS, J.H.WHITELAW, *Fluid mechanics of internal combustion engines - a review*, Proc. Instn. Mech. Engrs., vol.201, c1/87, 1987.
19. M.YIANNESKIS, M.J.TINDAL AND K.O.SUEN, *Swirl and squish effects in Diesel engine cylinders at high speeds*, 4, Międz. Symp. nt. Zastosowań LDA w Mechanice Płynów, Lizbona 1988.
20. G.D.PARTINGTON, *Analysis of steady flow tests on inlet and exhaust ports*, Ricardo Consulting Engineers, Report, D.P. 80/1123, 1980.
21. I.THIEH, *Accuracy of the Ricardo steady state flow rig*, Ricardo Consulting Engineers, Report, D.P. 82/20395, 1982.
22. N.F.GALE, *The impulse swirl meter*, Ricardo consulting engineers, Raport, D.P. 79/1232, 1979.
23. M.HAGHOOIE, J.C.KEWNT, R.J.TABACZYNSKI, *Intake valve cylinder boundary flow characteristics in an internal combustion engine*, Comb. Sci. Techn., 38, 49, 1984.
24. G.C.DAVIS, R.J.TABACZYNSKI, *The effect of inlet velocity distribution and magnitude on in-cylinder turbulence intensity and burnrate-model versus experiment*, in: Basic Processes in IC Engines, ICE, v.3, 1988.
25. P.WŁAD, M.WĘCLAŚ, *An analytical method of IC engines geometrical and inlet flow parameters optimization and some proposals for its experimental verifications*, Wyd. PAN, 3, Poznań 1988.
26. C.F.TAYLOR, *The internal combustion engine in theory and practice*, MIT Press, 64, 1966.
27. G.GREEVES, C.H.T.WANG, G.A.KYRIAZIS, *Inlet port design and fuel injection rate requirements for direct injection Diesel engines*, VDI Berichte, 370, 1980.
28. I.THIEH, *Accuracy of the Ricardo steady state flow rig*, Ricardo Consulting Engineers, Report, D.P. 82/20395, 1982.
29. J.C.KENT et al., *Effects of intake port design and valve lift on in-cylinder flow and burnrate*, SAE Paper, 872153, 1987.
30. V.SAXENA, R.B.RASK, *Influence of inlet flows on the flow field in an engine*, SAE Paper, 870369, 1987.

31. P.O.WITZE, J.M.C.MENDES-LOPES, *Direct measurement of the turbulent burning velocity in a homogeneous-charge engine*, SAE Paper, 861531, 1986.
32. D.R.LANCASTER, *Effect of engine variables on turbulence in a spark-ignition engine*, SAE Paper, 760159, 1976.
33. P.O.WITZE, *Measurements of the spatial distribution and engine speed dependence of turbulent air motion in an IC engines*, SAE Paper, 770220, 1977.
34. T.WAKISAKA et al., *Turbulence structure of air swirl in reciprocating engine cylinders*, Symp. nt. Przepływów w Silnikach Spalinowych, ASME WAM, 1982.
35. R.J.TABACZYNSKI, *Turbulence measurements and modelling in reciprocating engines - on overview*, I. Mech. Eng. C51/83, 1983.
36. M.L.MONAGHAN, H.F.PETTIFER, *Air Motion and its effect on Diesel performance and emissions*, SAE Paper, 810255, 1981.
37. D.E.FOSTER, P.O.WITZE, *Two-component laser velocimeter measurements in a spark ignition engine*, Sandia National Laboratories, Report, SAND 87-8817, 1987.
38. P.O.WITZE, J.K.MARTIN, C.BORGNACKE, *Conditionally-sampled velocity and turbulence measurements in a spark ignition engine*, Comb. Sci. Techn., 36, 1984.
39. T.KAMIMOTO, H.KOBAYASHI, *In-cylinder fluid dynamics of Diesel engines*, JSME Int. J., 31, 2, 1988.
40. S.MATSUSHITA et al., *Effects of helical port with swirl control valve on the combustion and performance of SI engine*, SAE Paper, 850046, 1985.
41. W.BRANDSTATTER, R.J.R.JOHNS, G.WIGLEY, *The effect of inlet port geometry on in-cylinder flow structures*, SAE Paper 850499, 1985.
42. W.F.BALL, H.PETTIFER, C.F.F.WATERHOUSE, *Laser Doppler velocimeter measurements of turbulence in a direct injection Diesel combustion chamber*, I. Mech. Eng., C52/83, 1983.
43. J.F.SINNAMON, D.R.LANCASTER, J.C.STEINER, *An experimental and analytical study of engine fuel spray trajectories*, General Motors Research Laboratories, Report, GMR-3128, 1980.
44. G.WIGLEY, J.RENSHAW, *In-cylinder swirl measurement by laser anemometry in a production Diesel engine*, AERE Harwell Laboratory, Report, AERE 9651, 1979.
45. T.SUZUKI, T.SHIOZAKI, *A new combustion system for the Diesel engine and its analysis via high speed photography*, SAE Paper, 770674, 1977.
46. M.WĘCLAŚ, *Diagnostyka procesów tworzenia mieszanki i spalania w silnikach spalinyowych metodami laserowymi, Problemy badawcze i perspektywy rozwoju*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, seria "Rozprawy" 223, 1990.
47. M.WĘCLAŚ, *Możliwości badań tworzenia mieszanki i jej spalania w silnikach spalinyowych laserowymi metodami połączonymi*, Silniki Spalinowe, 4, 1988.

48. M. WĘCLAŚ, *Perspektywy rozwoju diagnostyki procesów tworzenia mieszanki i spalania w silnikach spalinowych metodami laserowymi*, AUTO-Technika Motoryzacyjna, cz.1 i 2, 12/1989, 1/1990, 3/1990.

Резюме

АНАЛИЗ ИЗБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОТЕКАНИЕ ЗАРЯДА В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

В работе обращено особенное внимание на роль механики заряда в процессах образования смеси и сгорания, реализованных в двигателях внутреннего сгорания. Описаны основные параметры, характеризующие свойства протекания впускных систем двигателей внутреннего сгорания. Предложена эмпирическая зависимость, описывающая коэффициент наполнения цилиндра в функции геометрических параметров системы, вращательной скорости и коэффициента протекания. Определены оптимальные значения геометрических параметров и параметров протекания системы, обеспечивающих получение максимального коэффициента наполнения для семейств недозаряженных дизельных двигателей внутреннего сгорания. Сигнализируются главные исследовательские проблемы, связанные с процессами образования смеси и ее сгорания. Обращено внимание на необходимость поиска новых измерительных техник, с особым учетом лазерных методов.

STRESZCZENIE

ANALYSIS OF CERTAIN PARAMETERS DETERMINING THE FLOW OF LOAD IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Particular attention is paid to the role of load flow mechanics in the process of mixture formation and combustion occurring in the I.C. engines. Fundamental parameters are described, which characterize the flow properties in the induction systems of the engines. An empirical formula is proposed for the cylinder filling factor as a function of the geometrical and physical parameters of the system. Optimum values of the geometric and flow parameters are determined, securing the maximum filling factor of Diesel engines. Principal research lines concerning the mixture formation and combustion processes are indicated. Necessity of developing novel measurement techniques (laser techniques in particular) is substantiated.

POLITECHNIKA POZNAŃSKA INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ I SILNIKÓW SPALINOWYCH

Praca została złożona w Redakcji dnia 8 maja 1989 r.