

ZBIGNIEW KNEBA

STUDIUM PROBLEMÓW
ZARZĄDZANIA
CIEPŁEM ODPADOWYM SILNIKA
W SAMOCHODACH OSOBOWYCH

POLITECHNIKA GDAŃSKA

monografie

114

POLITECHNIKA GDAŃSKA

ZBIGNIEW KNEBA

STUDIUM PROBLEMÓW
ZARZĄDZANIA
CIEPŁEM ODPADOWYM SILNIKA
W SAMOCHODACH OSOBOWYCH



GDAŃSK 2011

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Romuald Szymkiewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR SERII

Marek Szkodo

RECENZENCI

Zdzisław Chłopek

Jerzy Merkisz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
www.pg.gda.pl/WydawnictwoPG

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2011

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-371-2

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	5
1. WPROWADZENIE	7
2. UKŁADY WYKORZYSTUJĄCE CIEPŁO SAMOCHODOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH	9
2.1. Wiadomości wstępne	9
2.2. Rozwiązania odprowadzenia ciepła dla zwiększenia sprawności napędu samochodu	13
2.3. Możliwości zamiany strumienia ciepła odpadowego silnika na moc użyteczną	17
2.4. Wykorzystanie ciepła do podgrzewania kabiny	19
2.5. Wykorzystanie ciepła do produkcji energii elektrycznej	20
2.6. Wykorzystanie ciepła odpadowego w układach z akumulacją ciepła	21
3. WPŁYW STANU CIEPLNEGO SILNIKA NA WŁAŚCIWOŚCI EKOLOGICZNE SAMOCHODU	24
3.1. Uwagi ogólne	24
3.2. Metodyka badań	24
3.3. Badania empiryczne wpływu stanu cieplnego silnika na emisje w gazach spalinowych i zużycie paliwa	26
3.4. Zużycie paliwa podczas krótkich jazd miejskich w zależności od początkowej temperatury cieczy chłodzącej.....	34
4. PODSUMOWANIE ANALIZY LITERATURY I WSTĘPNYCH BADAŃ AUTORA ORAZ SFORMUŁOWANIE ZADAŃ BADAWCZYCH.....	38
4.1. Podsumowanie stanu wiedzy.....	38
4.2. Zadania badawcze.....	39
4.3. Plan pracy	40
5. MODELOWANIE UKŁADU CHŁODZENIA SILNIKA	42
5.1. Wprowadzenie	42
5.2. Syntetyczny model układu chłodzenia	43
5.3. Przykład symulacji procesu rozgrzewania silnika z użyciem modelu grafów wiązań.....	46
5.4. Obliczenia symulacyjne z użyciem programu AMESim	47
5.5. Wymiana ciepła pomiędzy spalinami a otoczeniem	49
5.6. Wpływ zmniejszenia temperatury spalin na emisje węglodorów	52
6. BADANIA STANÓW PRACY SILNIKA SAMOCHODU OSOBOWEGO	54
6.1. Uwagi wstępne.....	54
6.2. Testowe obciążenia silników samochodowych	54
6.3. Wybrane przykłady obciążeń eksploatacyjnych	58
6.4. Ocena niepewności pomiarów drogowych	61
7. EMPIRYCZNE BADANIA PROCESÓW ROZGRZEWANIA I SCHŁADZANIA SILNIKA SAMOCHODU OSOBOWEGO	62
7.1. Uwagi wstępne	62
7.2. Stanowisko badawcze do badań układu chłodzenia	62
7.3. Rozgrzewanie silnika i praca w stanie równowagi cieplnej	68
7.4. Praca przy stałym obciążeniu silnika i nastawianej wydajności pompy cieczy chłodzącej.....	75
7.5. Stygnięcie silnika podczas postoju samochodu	80

8. WYBRANE SPOSOBY SKRÓCENIA OKRESU PRACY SILNIKA SAMOCHODOWEGO W NIEUSTALONYM STANIE CIEPLNYM	82
8.1. Współpraca pompy z napędem silnikiem elektrycznym z układem chłodzenia cieczą silnika samochodowego	82
8.2. Wykorzystanie zgromadzonego podczas jazdy ciepła do podgrzania silnika przed rozruchem	87
8.2.1. Badania innych autorów	87
8.2.2. Akumulator ciepła wykorzystujący ciecz chłodzącą	89
8.2.3. Bezpośrednie podgrzewanie cieczy chłodzącej spalinami	102
8.2.4. Wykorzystanie ciepła spalin do ładowania akumulatora ciepła	102
8.3. Badania wykorzystania ciepła do odparowania paliwa LPG	106
9. PODSUMOWANIE	115
9.1. Osiągnięte wyniki pracy	115
9.2. Kierunki dalszych badań	117
BIBLIOGRAFIA	118
Streszczenie w języku polskim	123
Streszczenie w języku angielskim	123

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

Oznaczenia

A	– przyspieszenie,
A	– pole powierzchni czołowej,
HC	– emisja węglowodorów,
α	– kąt nachylenia drogi,
CO	– emisja tlenu węgla,
c_v	– ciepło właściwe elementu przy stałej objętości,
c_x	– współczynnik oporu powietrza,
E_{CO}	– natężenie emisji tlenu węgla,
E_{HC}	– natężenie emisji węglowodorów,
F	– pole powierzchni (wymiany ciepła),
F_b	– siła oporów bezwładności,
F_m	– pole powierzchni wymiany ciepła przez ściankę metalową,
F_O	– pole powierzchni wymiany ciepła przez izolację,
F_p	– siła oporów powietrza,
F_w	– siła oporu wzniesienia,
F_t	– siła oporów toczenia,
g	– przyspieszenie ziemskie,
g_s	– grubość ścianki metalowej,
γ	– współczynnik efektu Seebera-Peltiera,
I	– natężenie prądu elektrycznego,
k_{SO}	– współczynnik przejmowania ciepła od cieczy chłodzącej do otoczenia przez osłonę izolacyjną,
k_Y	– współczynnik przenikania ciepła przez ściankę,
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła,
M	– moment obrotowy silnika,
m_C	– masa elementu,
m_c	– dopuszczalna masa całkowita,
m_{CO}	– emisja tlenu węgla,
m_{HC}	– emisja węglowodorów,
\dot{m}_w	– masowe natężenie przepływu cieczy chłodzącej,
m_s	– masa samochodu z kierowcą,
μ	– współczynnik oporu toczenia,
n	– prędkość obrotowa silnika,
N_e	– moc użyteczna silnika,
N_C	– liczba grafów w węźle zawierającym graf akumulatora C,
R	– rezystancja,
ρ	– gęstość powietrza,
v	– prędkość samochodu,
S	– entropia,
t	– czas,
T	– temperatura,
T_h	– temperatura wyższa i niższa przy wymianie ciepła,
T_l	– temperatura wyższa i niższa przy wymianie ciepła,
T_{SPS}	– temperatura na powierzchni ścianki metalowej od strony spalin,
T_{SCH}	– temperatura na powierzchni ścianki metalowej od strony cieczy,
T_O	– temperatura otoczenia,
U	– wektor sterowań (wejść),

- X – wektor zmiennych stanu,
Y – wektor parametrów wynikowych,

Skróty

- HDV – ciężki pojazd użytkowy, *ang. Heavy Duty Vehicle*,
LPG – mieszanina skroplonego propanu i butanu, *ang. liquified petroleum gas*,
NEDC – cykl jezdny na hamowni podwoziowej, *ang. New European Driving Cycle*,
PCM – substancja zmieniająca fazę,
EGR – układ recyrkulacji spalin,

Wykaz indeksów

- M1 – elementy metalowe silnika przejmujące ciepło od gazów w komorze spalania,
M2 – elementy metalowe silnika mające styk z otoczeniem i innymi elementami wewnątrz silnika, ale nie mające ścianki w komorze spalania,
M3 – elementy wewnątrz silnika nie mające ścianki ani w komorze spalania ani na zewnątrz silnika,
M4 – elementy metalowe będące w styku z gazami podczas spalania i przekazujące ciepło do oleju smarującego bez akumulacji ciepła,
M5 – elementy metalowe przekazujące ciepło do oleju i akumulujące energię cieplną,
ZO – zbiornik oleju,
ZW – zbiornik cieczy chłodzącej wewnątrz silnika – kanały i przestrzenie cieczy chłodzącej w bloku cylindrowym i głowicy,
KS – komora spalania jako jedyne źródło ciepła,
Ot – elementy rozpraszające ciepło do otoczenia o zadanej temperaturze,
CHW – chłodnica cieczy chłodzącej,
PW – pompa cieczy chłodzącej,
PO – pompa olejowa,
CHO – chłodnica oleju (opcjonalnie),
odprow – odprowadzane (ciepło),
TG – termogenerator,
w – woda albo ciecz chłodząca,
w2 – woda wypływająca z silnika,
w1 – woda wpływająca do silnika,
SP – spaliny,
CH – chłodnica,
in – wlot,
out – wylot,
k – nr elementu,
i – nr elementu.

Rozdział 1

WPROWADZENIE

W ciągu 120 lat eksploatacji samochodowych silników spalinowych dokonano wielkiego postępu. Pierwsze silniki stosowane do napędu samochodów osiągały moc 0,7 kW przy prędkości obrotowej 500 obr/min (samochód Karla Benza). Obecnie sportowe samochody osobowe dysponują mocą 420 kW przy 6800 obr/min (Mercedes SLS AMG). Sprawność silników samochodowych wzrosła. Pomimo tego nadal ogromna część energii jest tracona. Przykładowo, gdy kierowca wykorzystuje wspomniane 420 kW mocy, ponad 1200 kW jest doprowadzane do silnika jako strumień ciepła zawartego w paliwie. Największa sprawność ogólna silnika samochodowego to 40%, przy czym wartość ta uzyskiwana jest w ograniczonym obszarze pola pracy. Przyjmuje się, że co najmniej dwie trzecie energii zawartej w paliwie jest odprowadzane do otoczenia w postaci ciepła. Dotychczas zwiększenie sprawności silników odbywało się przez zmiany ich konstrukcji i sterowania. Rządziej zajmowano się wykorzystaniem ciepła odpadowego. Wykorzystywanie ciepła odpadowego silników spalinowych jest stosowane w siłowniach okrętowych i stacjonarnych. Stosowane tam rozwiązania wynikają z wielorakości potrzeb energetycznych odbiorników energii. Wykorzystanie występujących ogromnych mocy przynosi znaczne korzyści ekonomiczne, co więcej, układ energetyczny takiego silnika spalinowego zawiera urządzenia odprowadzania strumieni ciepła, mocy mechanicznej i elektrycznej. Trudno jest przenieść wprost gotowe rozwiązania układów energetycznych jednostek pływających do samochodów. Na przeszkodzie stoją głównie różnice w rozmiarach obiektów, ich kosztach oraz czas i sposób eksploatacji.

Analizując obecną konstrukcję samochodu, można dostrzec złożoność układu odprowadzania ciepła za pośrednictwem cieczy chłodzącej. Szczególnie w porównaniu do jego rozwiązań z pierwszej połowy XX wieku. Obecnie wykorzystuje się ciepło cieczy chłodzącej silnik do podgrzewania kabiny, paliw i innych płynów. Ciecz chłodząca wymienia ciepło dwukierunkowo z olejem, ochładza powietrze doprowadzane do spalania w silniku, chłodzi turbosprężarkę, schładza alternator i sterowniki elektroniczne.

Pomimo pojedynczych prób utylizacji dużej części ciepła [30] seryjne rozwiązania wykorzystania ciepła odpadowego w samochodzie ograniczają się często do ogrzewania kabiny. Do dyspozycji jest bardzo duża energia spalin (o temperaturze do około 800°C) oraz energia cieczy chłodzącej i oleju (o temperaturze do około 110°C).

W Katedrze Silników Spalinowych i Sprężarek (KSSiS) Politechniki Gdańskiej przez wiele lat prowadzone były prace poświęcone wykorzystaniu ciepła odpadowego silników spalinowych. Prace zostały rozpoczęte w zespole prof. Mariana Cichego projektami układów chłodzenia hamowni silnikowych dla Fabryki Samochodów Osobowych w Warszawie [32]. W zespole prof. Andrzeja Balcerskiego opracowywano zagadnienia utylizacji ciepła odpadowego silników okrętowych [2]. W KSSiS opracowano wdrożenie przemysłowe z udziałem autora, dotyczące odprowadzania ciepła od agregatu prądowłórczego napędzanego silnikiem spalinowym w warunkach tropikalnych [12]. Autor od początku swojej pracy w Politechnice Gdańskiej (1984 r.) bierze udział w projektach związanych z wykorzystaniem ciepła maszyn tłokowych, Pierwszą publikacją na ten temat przedstawił w 1986 r. [13]. Zagadnieniami wpływu pracy układu chłodzenia na parametry eksploata-

cyjne samochodów osobowych zajmuje się od początku lat 2000 [49]. Badania na hamowni podwoziowej prezentowane w tej pracy były możliwe dzięki pomocy zakładu Mercedes Benz Werk Bremen. Umieszczone w pracy wyniki pomiarów wykonanych w tym zakładzie są wskazane odsyłaczem [*].

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest modelowanie układów cieplnych, które jest częścią badań symulacyjnych służących rozwojowi konstrukcji samochodu. Ze względu na niższe koszty niż badania empiryczne modelowanie jest obecnie powszechnie stosowane, zwłaszcza w odniesieniu do obliczeń wytrzymałościowych, emisji szkodliwych związków w spalinach i zużycia paliwa. W ostatnich latach, we współpracy z prof. M. Cichym, opracowano modele matematyczne samochodów osobowych ze szczególnym uwzględnieniem pracy układu chłodzenia [15].

Podstawowym problemem wykorzystania ciepła jest trudność przetwarzania go na energię mechaniczną albo elektryczną. Niniejsza praca proponuje rozwiązanie alternatywne. Wskazuje na nowe możliwości sterowania odprowadzaniem ciepła. Zaproponowano nowe sposoby zarządzania stanem cieplnym silnika, które pośrednio wpływają na zmniejszenie zużycia paliwa i ograniczenie emisji związków toksycznych i rakotwórczych substancji zawartych w spalinach. W przyszłości w ruchu miejskim samochody napędzane silnikiem spalinowym będą musiały konkurować z samochodami ładowanymi z sieci elektroenergetycznej oraz napędzanymi ogniwami paliwowymi, dlatego należy nadal pracować nad udoskonaleniem spalinowego napędu samochodu.