

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA W KIELCACH

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Katedra Pojazdów Samochodowych i Transportu

Zakład Silników Ciepłych

Laboratorium Silników Ciepłych

Laboratorium z przedmiotu

OCHRONA ŚRODOWISKA W TRANSPORCIE

Instrukcja do ćwiczenia

**Pomiary zadymienia spalin tłokowych
silników spalinowych o zapłonie
samoczynnym**

Opracowali:
dr inż. Dariusz Kurczyński
dr inż. Tomasz Ambrozik

Kielce 2014

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów ze stosowanymi dymomierzami jak również metodami pomiarów zadymienia spalin silników ZS. W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów należy przedstawić zmiany zadymienia spalin na charakterystyce obciążeniowej.

2. Wiadomości ogólne

Spaliny silników o zapłonie ZS zawsze zawierają ślady sadzy. Wynika to z ich zasady pracy i sposobu mieszania paliwa z powietrzem. Przy niewłaściwym rozpyleniu paliwa, powiększeniu dawki ponad znamionową, stosowania niewłaściwego paliwa, a także nieprawidłowej regulacji układu zasilania lub złego stanu technicznego silnika emisja sadzy może wielokrotnie wzrosnąć. Spaliny przybierają wówczas niemal czarne zabarwienie, a przezroczystość ich maleje w takim stopniu, że ograniczają widoczność na drodze.

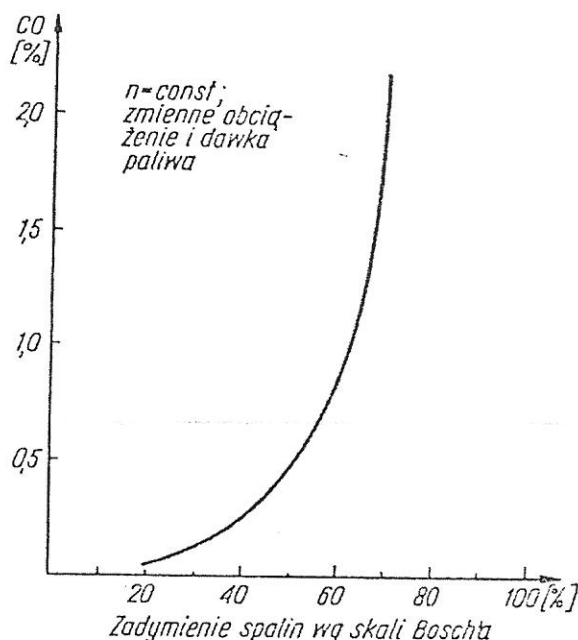
Wyraźne zabarwienie spalin występuje przy zawartości sadzy $100\div 120\text{ mg/m}^3$. Przy koncentracji około 600 mg/m^3 spaliny stają się ciemno szare, niemal czarne. Przy większej zawartości sadzy tworzą czarny nieprzezroczysty dym.

Wszystkie stosowane praktycznie metody pomiarowe można podzielić na cztery grupy pod względem zasady pomiaru.

- metoda bezpośrednia polegająca na filtracji określonej objętości spalin, a następnie ważenie zatrzymanej sadzy.
- metoda pośrednia wykorzystująca zależność pomiędzy zawartością sadzy i tlenku węgla w spalinach.
- metoda analogiczna do pierwszej, ale oceniająca zadymienie spalin stopniem zaciemnienia bibuły filtracyjnej.
- metoda bezpośredniej oceny stopnia przezroczystości spalin.

Metody zaliczone do jednej grupy mogą różnić się między sobą szczegółami technicznymi i stosowanymi urządzeniami. Metoda pierwsza stosowana jest bardzo rzadko i to wyłącznie w warunkach laboratoryjnych. Związana jest ona z trudnościami technicznymi wynikającymi z konieczności przepuszczenia przez filtr zatrzymujący bardzo drobne cząstki (rzędu $0,05\text{ mikrometra}$) stosunkowo dużej masy spalin, aby zatrzymana sadza dała się zważyć bez konieczności stosowania ultraczułych wag. Filtr o tak dużych zdolnościach filtrujących, a zarazem o niezbyt wielkich oporach przepływu musi mieć odpowiednio duże wymiary i masę, co dodatkowo utrudnia ważenie zatrzymanej sadzy.

Oddzielnym problemem występującym w różnym stopniu w pozostałych metodach jest oddzielenie wody zawartej w spalinach. Jeżeli woda ta ulega kondensacji przed filtrem to skropli się równocześnie część węglowodorów zawartych w spalinach oraz zostanie zatrzymana (zmoczona wodą) pewna ilość sadzy. Kondensat jest zawsze silnie zanieczyszczony sadzą i może zawierać ślady paliwa i oleju, ma barwę brunatną lub czarną. Jeżeli natomiast przez filtr przechodzą spaliny o temperaturze powyżej 100°C to połączone jest to z dodatkowymi trudnościami technicznymi, a razem z parą wodną uchodzą lżejsze węglowodory. W metodzie drugiej wykorzystano powiązanie stopnia zadymienia spalin z zawartością w nich tlenku węgla, jako produktu m.in. dysocjacji termicznej CO_2 , przy której wydzielana jest również sadza. Przykładową taką zależność określoną dla silnika doświadczalnego przedstawiono na rys. 1



Rys.1. Przykładowa zależność zawartości tlenku węgla w spalinach silnika o zapłonie samoczynnym od stopnia zadymienia

Zależność ta ma charakter przybliżony i może być wyznaczona jedynie na drodze empirycznej, stwierdza się przy tym silny wpływ rozwiązania konstrukcyjnego silnika, jego stanu technicznego, warunków pracy, a nawet gatunku paliwa. Ponadto metoda ta wymaga ze względu na małe stężenie tlenku węgla w spalinach silników o zapłonie samoczynnym, odpowiednio czułych analizatorów. Ma ona dziś znaczenie raczej historyczne. Była sporadycznie stosowana podczas badań kontrolnych większej liczby silników jednego typu, ze względu na prostotę postępowania i możliwość dokonywania pomiarów w sposób ciągły oraz rejestrację wyników.

Powszechne zastosowanie znalazły dwie ostatnie metody opisane szczegółowo w dalszym ciągu instrukcji, na przykładzie konkretnych urządzeń pomiarowych produkowanych seryjnie i zalecanych przez normy różnych krajów. Niezależnie od metody i urządzenia pomiarowego, bardzo istotny wpływ na wynik pomiaru ma sposób pobierania próbek spalin.

3. Budowa i działanie dymomierzy

3.1. Dymomierze filtrujące

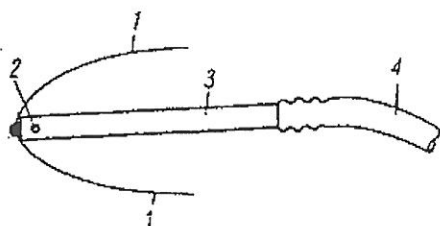
Zasada działania dymomierzy filtrujących polega na przepuszczeniu przez bibułę filtracyjną ściśle określonej objętości spalin, a następnie ocenie stopnia zaciemnienia bibuły osadem naniesionym przez spaliny.

Rozwiązania konstrukcyjne poszczególnych typów dymomierzy należących do tej grupy różnią się niekiedy znacznie szczegółami, ale wszystkie – jak wynika z zasady pomiaru – zawierają trzy odrębne elementy, realizujące odrębne zadania. Są to:

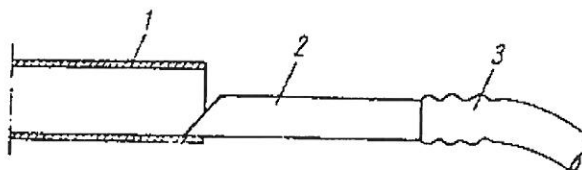
- sonda wraz z przewodami, przystosowana do umieszczenia w rurze wydechowej samochodu lub instalacji wydechowej hamowni silnikowej;
- urządzenie zasysające próbkę spalin przez bibułę filtracyjną;
- urządzenie oceniające stopień zaciemnienia bibuły;

W grupie dymomierzy filtrujących należy wymienić: najbardziej rozpowszechniony dymomierz firmy BOSCH oraz dymomierze o znaczeniu raczej historycznym, ale godne

uwagi dla poznania kierunków rozwoju metod pomiaru. Są to dymomierze MOTORPAL, JaMZ i SAURER.



Rys.2. Schemat sondy dymomierza firmy BOSCH: 1 – sprężyste elementy utrzymujące sondę w osi rury wydechowej; 2 – otwór wlotowy do sondy; 3 – rura sondy; 4 – przewód elastyczny



Rys.3. Sonda dymomierza PAL:
1 – rura wydechowa samochodu (silnika);
2 – rura sondy;
3 – przewód elastyczny

Sondy dymomierzy BOSCH przeznaczone do umieszczania w rurze wydechowej samochodu zawierają uchwyt rozprężny zapewniający samoczynne centryczne ustawienie sondy w rurze wydechowej (rys. 2). Zarówno średnica zewnętrzna sondy jak i szerokość płaskich sprężyn uchwytu centrującego są znacznie mniejsze od wewnętrznej średnicy rury wydechowej przeciętnego samochodu ciężarowego i nie powodują poważniejszych zmian oporu przepływu spalin. Otwory wlotowe do sondy znajdują się w pobliżu jej ślepego końca i umieszczone są w płaszczyźnie prostopadłej do osi sondy. W ten sposób ogranicza się wpływ ewentualnych zakłóceń przepływu i eliminuje wpływ naporu aerodynamicznego. Sondę tę wprowadza się na całą jej długość do rury wydechowej. Unormowana jest przy tym minimalna długość prostego odcinka rury wydechowej, przez którą muszą przepływać spaliny przed przedostaniem się do sondy, jak również sposób postępowania, gdy ze względu na kształt rury wydechowej warunek ten nie może być spełniony. Wymagania te znajdują swe uzasadnienie w tym, że wynik pomiaru zadymienia spalin może w pewnym stopniu zależeć od miejsca poboru próbki spalin.

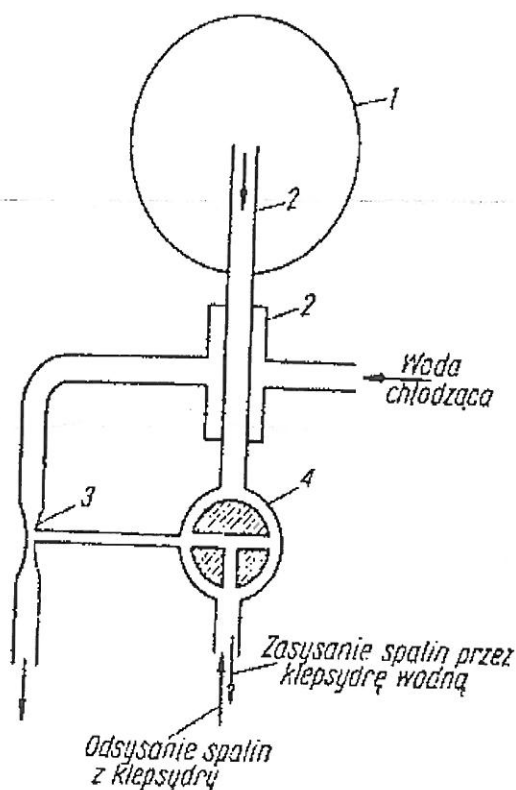
W dymomierzu MOTORPAL średnica sondy jest znacznie większa, rzędu połowy średnicy przeciętnej rury wydechowej. Sonda ta jest otwarta na końcu i ścięta pod kątem 45°. Umieszcza się ją u wylotu rury wydechowej samochodu (rys. 3), opierając na jej dnie. Wlot do sondy znajduje się przy tym w przestrzeni, w której panuje ciśnienie atmosferyczne. Napór strumienia spalin ma w tych warunkach znikomą, pomijalną wartość.

Decydujący wpływ na wyniki pomiarów wykazuje nie temperatura spalin napływających do sondy, ale napływających do urządzenia zasysającego, gdyż od niej ostatecznie zależy masa spalin, jakie przepłynęły przez bibułę filtracyjną. Na drodze od sondy do urządzenia zasysającego spaliny ulegają dodatkowemu ochłodzeniu. Jednak ze względu na małą pojemność cieplną łączącego te elementy przewodu z tworzywa sztucznego lub gumy syntetycznej oraz stosunkowo krótki czas zasysania, temperatura wewnątrz urządzenia zasysającego jest bezpośrednio po zakończeniu napływu spalin na ogół wyższa od temperatury otoczenia.

Dlatego też w dymomierzu JaMZ przewidziano chłodzenie sondy wodą w celu obniżenia temperatury spalin już na początku ich drogi w sondzie. Rozwiązanie to pokazano na (rys. 4). Znalazło ono zastosowanie przy badaniach hamownianych. Sonda zamocowana jest w rurze wydechowej za pośrednictwem złącza gwintowanego w taki sposób, aby wlot do niej znajdował się dokładnie w osi rury wydechowej.

Woda po wyjściu z komory chłodzącej sondy przepływa do strumienicy umożliwiającej odsysanie kondensatu z przewodów sondy. Kurek trój-drożny umożliwia łączenie urządzenia zasysającego na przemian z sondą lub strumienicą.

W przypadku badań hamowanianych – zależnie od rozwiązania układu odprowadzenia spalin z hamowni – mogą występować różnice ciśnień spalin i w mniejszym stopniu ich temperatury – wpływające w uchwytyny sposób na wyniki pomiarów dymienia. Wpływ temperatury i można łatwo wyeliminować przez chłodzenie sondy, zaś bardziej istotny wpływ ciśnienia wymaga stosowania odpowiednich współczynników korekcyjnych ustalonych empirycznie w postaci tabeli poprawek



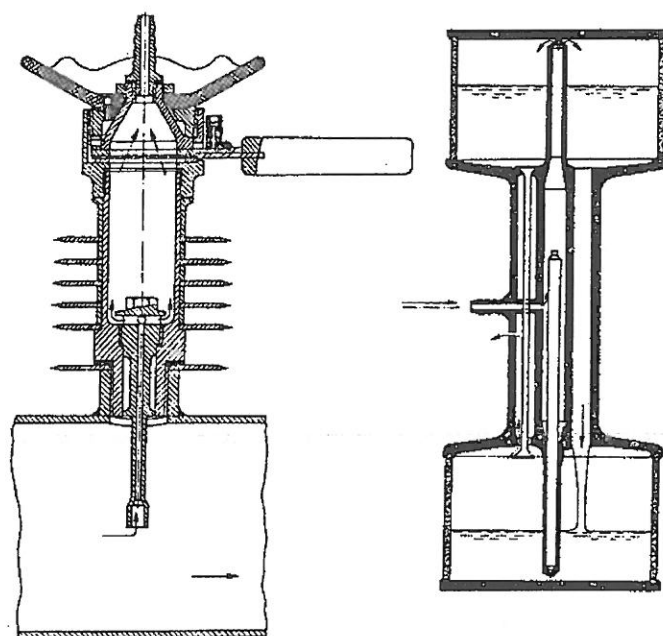
Rys.4. Sonda dymomierza JaMZ: 1 – rura wydechowa samochodu (silnika); 2 – płaszcz chłodzenia wodą; 3 – eżektor; 4 – zawór trójdrożny

Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że ze względu na możliwe bardzo duże różnice konstrukcyjne różnych układów wydechowych, wyniki pomiarów dymienia przeprowadzane podczas badań hamownianych należy traktować jako względne, a porównywanie wyników uzyskanych na różnych hamowniach może (choć nie musi) prowadzić do błędnych wniosków.

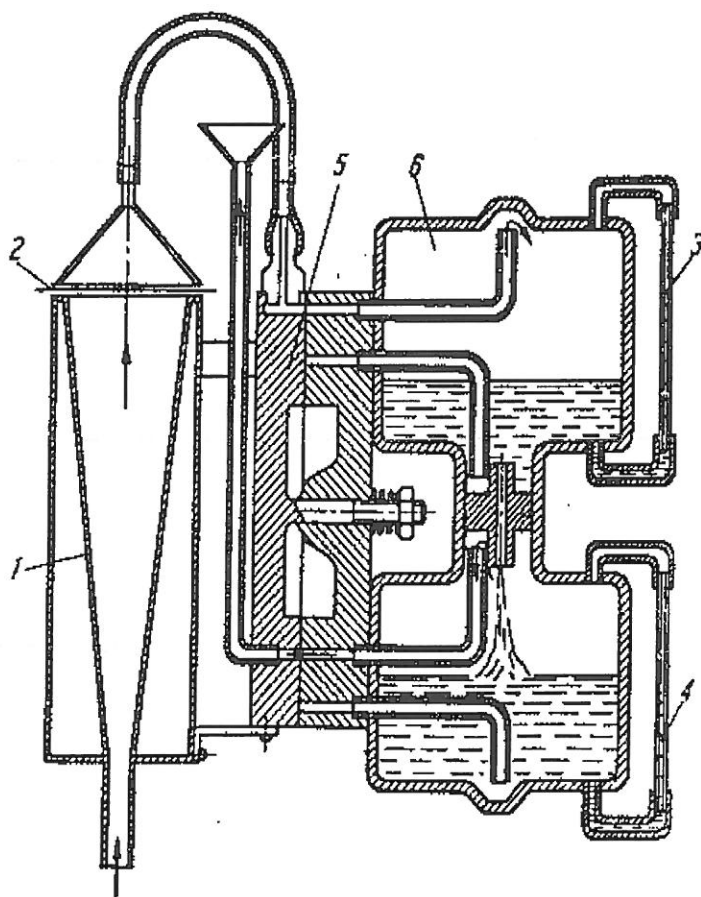
Urządzenia zasysające spaliny muszą zapewniać możliwie dokładne odmierzanie ich objętości. Stosowane są - w różnych odmianach konstrukcyjnych - dwa podstawowe rodzaje tych urządzeń:

- zasysające na zasadzie klepsydry wodnej,
- pompki tłoczkowe.

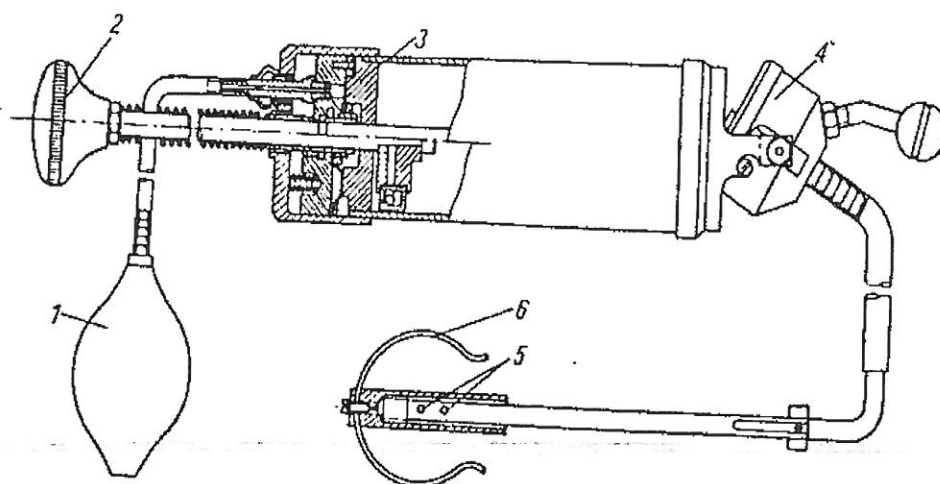
Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono urządzenia pierwszego rodzaju firmy Saurer i firmy JaMZ. Zasada ich działania jest bezpośrednio widoczna z rys. 6. Warto jedynie zwrócić uwagę na to, że przepływ wody odbywa się przez zwężkę lub rurę o niewielkiej średnicy w celu przedłużenia czasu zasysania próbki spalin i zmniejszenia dzięki temu prawdopodobieństwa poboru próbki o przypadkowym składzie. Urządzenia tego rodzaju pomimo ich prostoty i prawidłowego spełniania podstawowego zadania wychodzą z użycia i są zastępowane przez wygodniejsze podczas pomiarów zasysacze tłoczkowe. Najbardziej rozpowszechnionym przedstawicielem tej grupy jest zasysacz stosowany w dymomierzu firmy BOSCH (rys. 7)



Rys. 5. Schemat zasysacza dymomierza firmy SAURER

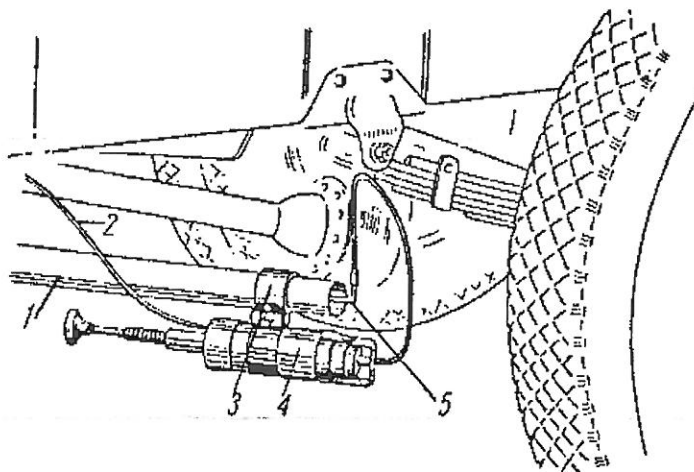


Rys. 6. Schemat zasysacza dymomierza JaMZ: 1 – rura dyfuzora; 2 – wkładka filtrująca;
3 i 4 – wskaźnik poziomu wody; 5 – obudowa; 6 – komora



Rys.7. Zasysacz dymomierza firmy BOSCH: 1 – gruszka pneumatycznego urządzenia zwalniającego zatrzask tłoka; 2 – rękojeść tłoka; 3 – tłok z urządzeniem zatrzaskowym; 4 – kaseta bibuły filtrującej; 5 – wyloty; 6 – osłona

Uniezależniono w nim sposób pobierania (zasysania) spalin od indywidualnych cech obsługującego: roboczy ruch tłoczka odbywa się pod wpływem działania uprzednio napiętej sprężyny. Zastosowano przy tym oryginalny sposób zdalnego uruchamiania zasysacza. Zaczep napiętej ręcznie sprężyny zwalniany jest przez urządzenie pneumatyczne.



Rys.8. Sposób mocowania zasysacza dymomierza BOSCH na samochodzie: 1 – rura wydechowa samochodu; 2 – przewód urządzenia pneumatycznego zwalniającego zatrzask tłoka; 3 – uchwyt mocujący; 4 – pompa zasysacza; 5 – sonda

Niezbędny impuls ciśnienia uzyskuje się przez energiczne ściśnięcie gruszki gumowej połączonej kilkumetrowej długości przewodem z dość sztywnego tworzywa sztucznego z mechanizmem zwalniającym. Dzięki temu możliwe jest uruchomienie z miejsca kierowcy zasysacza umieszczonego u wylotu rury wydechowej (rys. 8) Przewód elastyczny doprowadzający spaliny do zasysacza musi mieć niewielką objętość, gdyż zawarte w nim przed pomiarem powietrze powoduje zmniejszenie ilości rzeczywiście zassanych spalin. Dlatego też zamiana oryginalnego przewodu przez inny o większej długości lub średnicy dokonywana niekiedy ze względów technicznych (możliwość zamocowania zasysacza) lub z powodu konieczności zastąpienia zużytego przewodu oryginalnego przez aktualnie dostępny, zawsze wpływa na zmniejszenie wyniku pomiaru. Wynikające stąd różnice mogą być istotne.

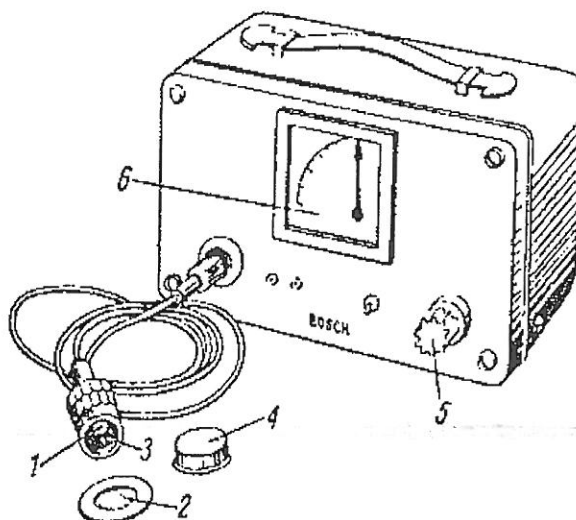
Zasysacze obu wymienionych wyżej rodzajów wymagają ręcznego zakładania wkładu z bibuły filtracyjnej, a następnie wyjęcia go i poddania ocenie stopnia zaciemnienia. Postępowanie takie nie nastręcza żadnych trudności przy pojedynczych pomiarach jest natomiast uciążliwe podczas długotrwałych badań hamownianych, tym bardziej jeszcze, że poszczególne wkłady bibuły filtracyjnej muszą być oznaczane w celu umożliwienia ich późniejszej identyfikacji.

Dlatego też dla potrzeb badań hamownianych opracowano zautomatyzowaną wersję dymomierzy. Pompa zasysająca, zdalnie sterowana uruchamiana jest wówczas elektrycznie lub pneumatycznie (z sieci sprężonego powietrza), zasysa spaliny przez samoczynnie przesuwaną po każdym pomiarze taśmę z bibuły filtracyjnej, która następnie przechodzi do miernika zaciemnienia. Wynik pomiaru uzyskuje się w tym przypadku po kilku czy kilkunastu sekundach od naciśnięcia przycisku uruchamiającego zasysacz, a cały dymomierz jest w tym samym czasie przystosowany do nowego pomiaru.

Konieczne jest tu podkreślenie, że ze względu na niewielką pojemność skokową urządzenia zasysającego ($0,33 \text{ dcm}^3$ w dymomierzu BOSCH) pojemność sondy i przewodu elastycznego łączącego ją z zasysaczem musi być także ściśle ograniczona, a zmiana tych elementów powoduje zmianę ilości spalin jakie w rzeczywistości ulegają przefiltrowaniu przez bibułę, a tym samym na zmianę wskazań dymomierza.

Stopień zadymienia spalin ocenia się przez pomiar stopnia zaciemnienia wkładu filtrującego. Początkowo zaciemnienie to określano przez porównanie ze skalą wzorcową (np. stosowana dawniej w USA skala Ringelmann). Następnie wprowadzono bardziej obiektywne metody pomiaru natężenia światła odbitego od zaciemnionej bibuły.

W przypadku dymomierza BOSCH krążek bibuły po przepuszczeniu przez niego badanych spalin wkłada się do specjalnego urządzenia (rys. 9), w którym oświetlany jest umieszczoną w osi żarówką, a światło odbite pada na otaczającą ją pierścieniowe fotoogniwo. Fotoogniwo połączone jest elektrycznie z miernikiem wyskalowanym w umownych jednostkach. Zero skali odpowiada czystej bibule, odbijającej maksimum padającego na nią światła. Sto jednostek skali odpowiada całkowitemu pochłonięciu światła przez zaciemnioną bibułę. Potencjometr umieszczony w obwodzie zasilania żarówki pozwala na dobranie takiego natężenia płynącego przez nią prądu, a więc i intensywności światła, aby wskazówka przyrządu mogła ustawić się na zerze po umieszczeniu w przyrządzie krążka czystej bibuły. Pokrywka przyrządu zamykająca szczelnie jego układ optyczny wyklejona jest od wewnątrz czarnym, matowym pluszem spełniającym rolę ciała absolutnie czarnego, pochłaniającego całość padającego na nie promieniowania świetlnego. Umożliwia ona ustawienie wskaźnika na 100 jednostek.



Rys.9. Miernik zaciemnienia bibuły filtracyjnej dymomierza firmy BOSCH:
1 – źródło światła; 2 – krążek bibuły filtracyjnej; 3 – fotoogniwo pierścieniowe; 4 – pokrywka przytrzymująca bibułę filtracyjną; 5 – potencjometr; 6 – wskaźnik zaciemnienia bibuły filtracyjnej

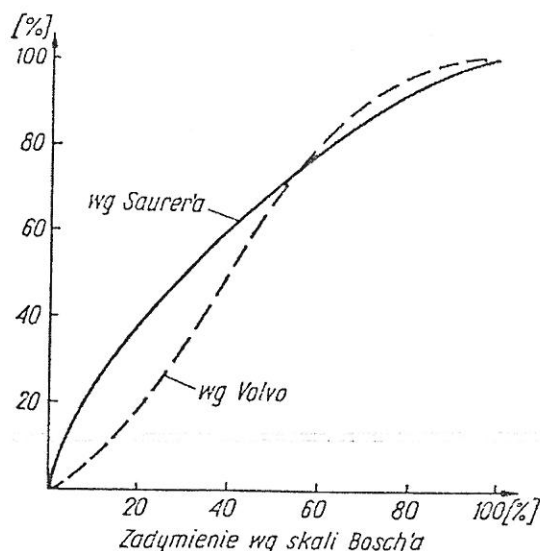
Od jej gatunku, a w szczególności od faktury powierzchni. Bibuły o fakturze silnie porowatej powodują silniejsze rozpraszanie światła, skutkiem czego po częściowym pokryciu sadzą odbijają w kierunku foto-ogniwa mniejszą ilość energii świetlnej niż bibuły o gładziej powierzchni.

Zdolność odbijania światła przez zaciemnioną bibułę zmienia się znacznie przy zmianach jej zawilgocenia. Duży wpływ także może mieć rozmazanie osadzonej na powierzchni warstwy sadzy.

Zazwyczaj ze względów organizacyjnych podczas badań nie ocenia się każdego krążka bibuły oddzielnie, lecz mierzy się stopień ich zaciemnienia dla całej partii krążków odpowiadającej określonemu fragmentowi badań. W celu uniemożliwienia prawdopodobnych w tej sytuacji omyłek krążki te muszą być oznakowane w sposób pozwalający na późniejszą jednoznaczną ich identyfikację. Oznaczenia nanosi się na części krążka nie pokrywanej osadem sadzy (względnie na odwrocie). Do czasu pomiaru krążki wymagają przechowywania w sposób

w pełni zabezpieczający je przed zawilgoceniem i rozmazaniem osadzonej warstwy sadzy. Najlepiej nadają się do tego celu specjalnie przystosowane płaskie pudełka z przezroczystą pokrywą i oddzielnymi wgłębieniami na każdy krążek bibuły. Niewłaściwe jest przechowywanie krążków w kopertach – dość często praktykowane w praktyce laboratoryjnej.

Podane wyżej uwagi dotyczą także wszystkich innych metod filtracyjnych pomiaru zadymienia spalin.



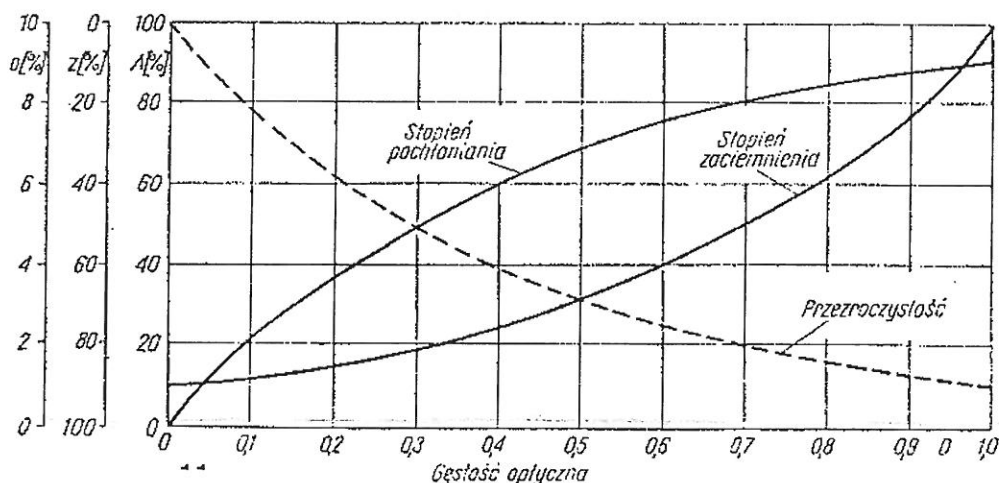
Rys.10. Porównanie wskazań dymomierzy: SAURER, VOLVO i BOSCH

Wskazania miernika zależą w niewielkim stopniu od charakterystyki żarówki oraz w znacznie większym od charakterystyki fotoogniwa. Obydwa te elementy w miarę starzenia zmieniają swe charakterystyki w stopniu niekiedy istotnym dla wyniku pomiarów. Dlatego też konieczna jest okresowa kontrola urządzenia pomiarowego przez porównanie jego wskazań ze wskazaniami urządzenia wzorcowego (tego samego typu bądź też przez użycie wzorców zaciemnienia: krążków papieru z naniesioną siatką czarnych linii zajmujących ściśle określoną i znaną część jego powierzchni – równą stopniowi zaczernienia. Na rys. 10 podano równanie wskazań niektórych typów dymomierzy.

3.2. Dymomierze oceniające bezpośrednio zadanie spalin

Dymomierze bezpośrednio oceniające stopień zadymienia spalin dzielą się na dwie grupy podstawowe zależnie od tego czy ocena dokonywana jest na podstawie pomiaru dotyczącego

- części spalin wydalanych przez silnik, czy też
- całość spalin przechodzi przez urządzenie pomiarowe. Niezależnie jednak od typu oceniają one stopień zadymienia spalin przez bezpośredni pomiar jednej z 5 następujących wielkości fizycznych wzajemnie współzależnych (rys. 11).



Rys.11. Zależność stopnia pochłaniania światła A, stopnia zaciemnienia spalin Z i przezroczystości P od gęstości optycznej D

- przezroczystości spalin

$$P = \frac{\Phi_o}{\Phi}$$

- stopnia zaciemnienia spalin

$$Z = \frac{1}{P} = \frac{\Phi_o}{\Phi}$$

- stopnia pochłaniania światła (absorbpcji promieniowania)

$$A = 1 - P = \frac{\Phi_o - \Phi}{\Phi_o}$$

- gęstości optycznej spalin

$$D = \log Z = \log \frac{\Phi_o}{\Phi} = \log \frac{1}{1 - A}$$

- współczynnika pochłaniania światła (absorbpcji promieniowania)

$$k = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{1 - A}$$

gdzie:

Φ_o - natężenie strumienia światła przed przejściem przez słup gazu,

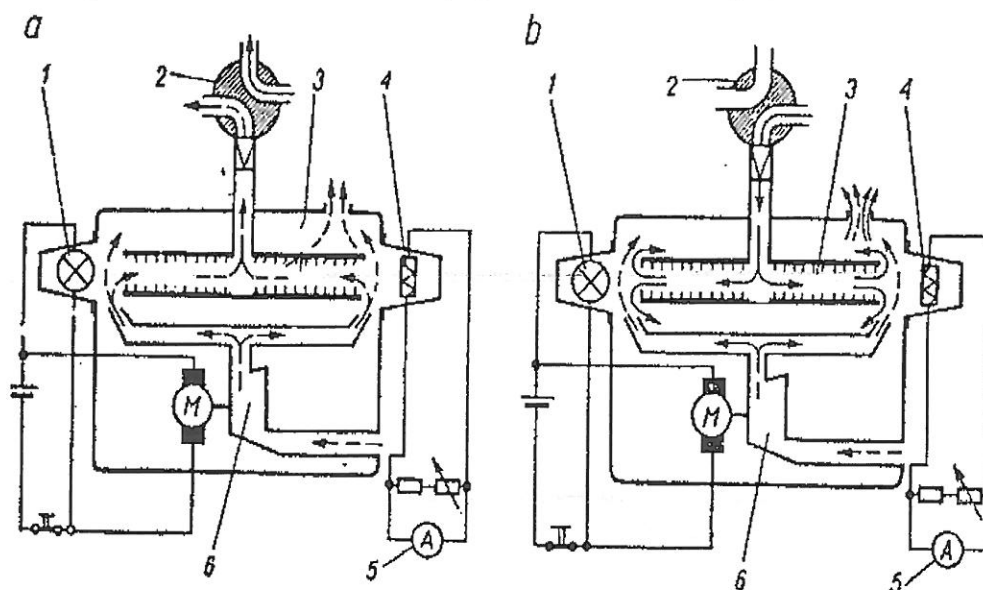
Φ - jak wyżej – po przejściu przez słup gazu,

L - długość słupa gazu. Większość urządzeń pomiarowych wyposażona jest w dwie skale:

- liniową, stopnia pochłaniania światła A, której zero odpowiada całkowitej przezroczystości spalin ($\Phi_o = \Phi$), a podziałka 100 - całkowitej nieprzezroczystości ($\Phi = 0$),
- logarytmiczną, wyrażoną w jednostkach współczynnika pochłaniania (m^{-1}), której zero odpowiada całkowitej przezroczystości spalin, a nieskończoność - całkowitej nieprzezroczystości.

Spśród dymomierzy przystosowanych do przepuszczania części spalin uchodzących z badanego silnika najbardziej rozpowszechnione są: produkowany w NRD dymomierz RDM-4 i stosowany powszechnie w krajach zachodniej Europy dymomierz Hartridge'a. Schemat dymomierza RDM-4 przedstawiono na rysunku 12. W skład jego wchodzi rura pomiarowa o długości 400 mm od wewnątrz starannie zaczerniona i wyposażona w szereg pierścieniowych przesłon zapewniających turbulentny przepływ gazów. Z jednej jej strony znajduje się źródło

światła: żarówka 12V-50W, z drugiej fotoogniwo selenowe o średnicy 45 mm i powierzchni użytecznej $11,3 \text{ cm}^2$ oraz czułości powyżej $0,32 \mu\text{A/lx}$ przy zerowym oporze zewnętrznym i oświetleniu światłem monochromatycznym o długości fali $700 \mu\text{m}$. W roli wskaźnika występuje mikroamperomierz o zakresie 100 A, oporności 500Ω klasy 1,5.

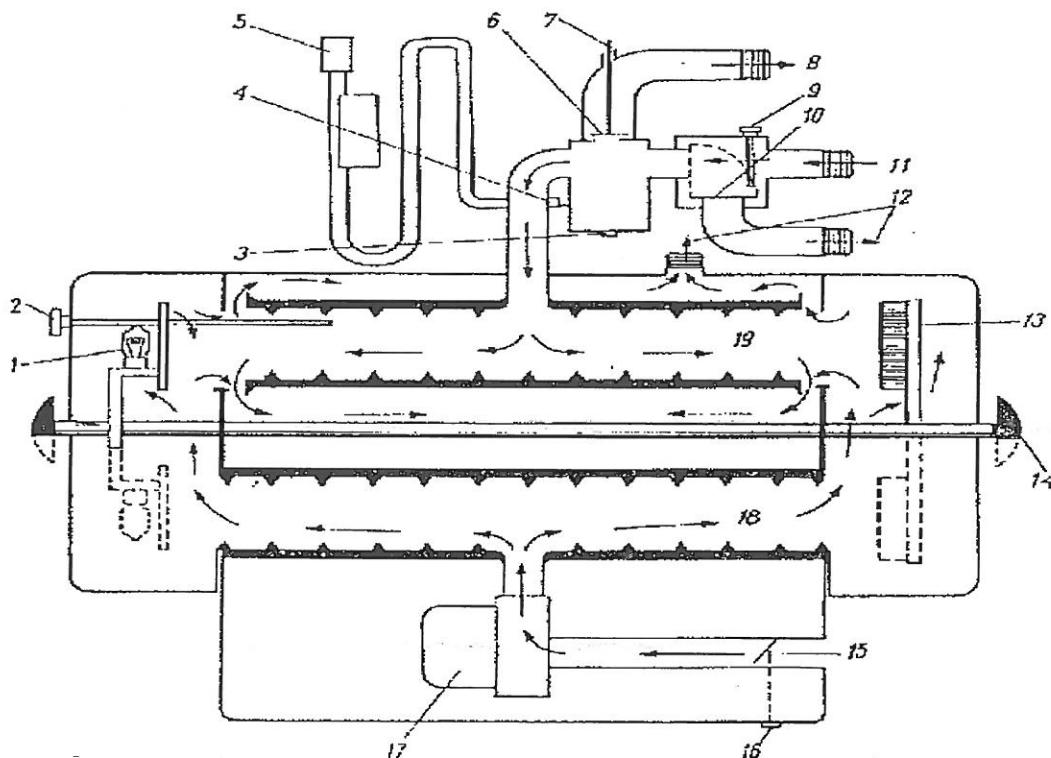


Rys.12. Schemat dymomierza RDM-4: 1 – oświetlacz; 2 – zawór czwódrożny; 3 – rura pomiarowa; 4 – fotoogniwo; 5 – miliamperomierz; 6 – dmuchawa;
 — strumień spalin; - - - - strumień powietrza
 a – położenie zaworu przy zerowaniu, b – położenie zaworu podczas pomiaru

W skład urządzenia wchodzi ponadto dmuchawa, zawór czwódrożny, potencjometr w obwodzie fotoogniwa oraz zawór samoczynny o ciśnieniu otwarcia 80 mm słupa wody. Zasada działania widoczna jest bezpośrednio ze schematu: przed właściwym pomiarem – przy ustawieniu zaworu czwódrożnego, jak na rys. 12a wewnątrz dymomierza wypełnione jest powietrzem dostarczającym przez dmuchawę. Po włączeniu źródła światła następuje zerowanie wskaźnika przy użyciu potencjometru. Warto przy tym zwrócić uwagę, że podobnie jak przy dymomierzu typu BOSCH, zero wskaźnika odpowiada maksymalnemu przepływowi prądu (w danym przypadku $100 \mu\text{A}$, natomiast maksymalne wskazanie wynoszące 100 jednostek zadymienia odpowiada zerowemu natężeniu prądu. Po wyłączeniu oświetlenia miernik wskazuje stale 100 jednostek.

Po przestawieniu zaworu w pozycję pomiar przez rurę pomiarową przepływają spaliny, przy czym nadciśnienie ich nie może przekroczyć 80 mm słupa wody, gdyż przy takiej jego wartości otwiera się zawór samoczynny upuszczając część spalin przewodem bocznikowym. Strumień powietrza dostarczanego przez dmuchawę nie przedostaje się teraz do wnętrza rury pomiarowej, natomiast przepływając pomiędzy jej otwartymi końcami a żarówką lub fotoogniwem chroni je skutecznie przed zabrudzeniem sadzą niesioną przez spaliny. Stopień zadymienia spalin równy stopniowi pochłaniania światła A wskazywany jest na liniowej skali miernika (w %).

Na rysunku 13 przedstawiono schemat dymomierza Hartridge'a. Zasada działania jest tu analogiczna do opisanej powyżej. Różnice dotyczą jedynie szczegółów konstrukcyjnych i dodatkowego wyposażenia. Dymomierz ten zawiera dwie identyczne rury pomiarowe o długości 407 mm. Przez jedną z nich po włączeniu dmuchawy przepływa zawsze powietrze, przez drugą badane spaliny.



Rys.13. Schemat dymomierza Hartidge'a: 1 – oświetlacz; 2 – termometr; 3 – korek spustowy kondensatu; 4 – miejsce podłączenia manometru; 5 – manometr; 6 – samoczynny zawór ciśnieniowy; 7 – wskaźnik działania; 8 – ujście nadmiaru spalin; 9 – termometr; 10 – przepustnica; 11 – wlot spalin; 12 – wylot spalin; 13 – fotoogniwo; 14 – oś obrotu oświetlacza i fotoogniwo; 15 – wlot powietrza; 16 – przepustnica powietrza; 17 – dmuchawa; 18 – rura pomiarowa powietrzna; 19 – rura pomiarowa spalinowa

Zamiast przełączania zaworu i zmiany kierunku przepływu spalin, następuje tu równoczesny obrót źródła światła i fotoogniwa i ustawienie ich bądź w osi rury pomiarowej, bądź rury wypełnionej powietrzem. Dymomierz typu Hartridge'a wyposażony jest również w samoczynny zawór ciśnieniowy, ręcznie sterowany zawór umożliwiający przepuszczanie spalin z pominięciem rury pomiarowej, a także termometry do pomiaru temperatury spalin na wejściu do dymomierza i wewnątrz rury pomiarowej oraz manometr wodny umożliwiający pomiar nadciśnienia spalin na wejściu do dymomierza. Przewidziano również odстойnik dla kondensującej pary wodnej

Temperatura spalin wewnątrz rury pomiarowej winna zawierać się w ; granicach $60 \div 120^{\circ}\text{C}$, przy czym wynik pomiaru sprowadza się do znamionowej temperatury pomiaru wynoszącej 100°C wg zależności:

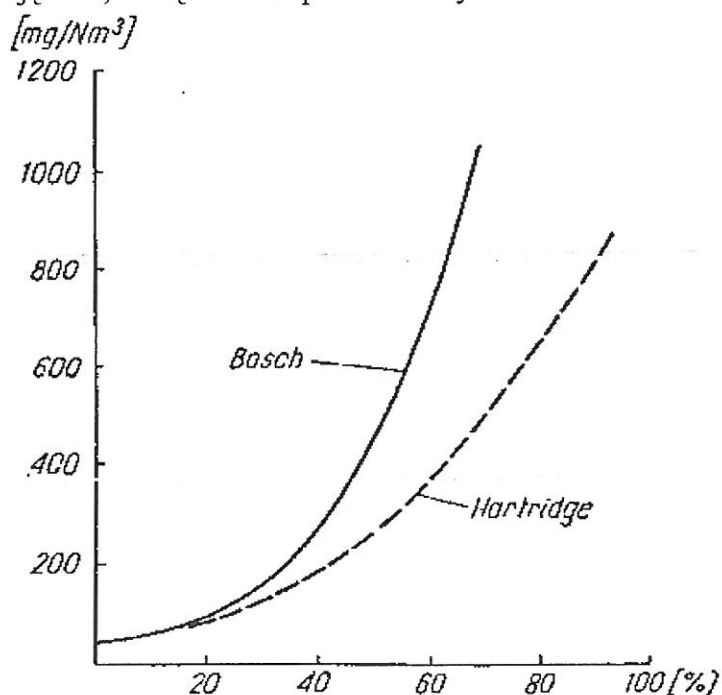
$$k_{red} = k \frac{t + 273}{373} [\%]$$

gdzie: k współczynnik pochłaniania odczytany ze skali miernika w %. Miernik ma skalę podwójną: bezwzględną (logarytmiczną) w jednostkach (m^{-1}) i względną w jednostkach zadymienia $A_{0,407}$ [%]. t – temperatura wewnątrz rury pomiarowej w $^{\circ}\text{C}$.

Dolna granica dopuszczalnej temperatury wewnątrz rury pomiarowej dobrana została w taki sposób, aby kondensacja pary wodnej zawartej w spalinach występowała w tak małym stopniu, który praktycznie nie powoduje zmiany zadymienia spalin. Kropelki kondensującej wody wytrącają z aerozolu – jakim są spaliny – pewną ilość sadzy, wpływając w ten sposób na wynik pomiaru.

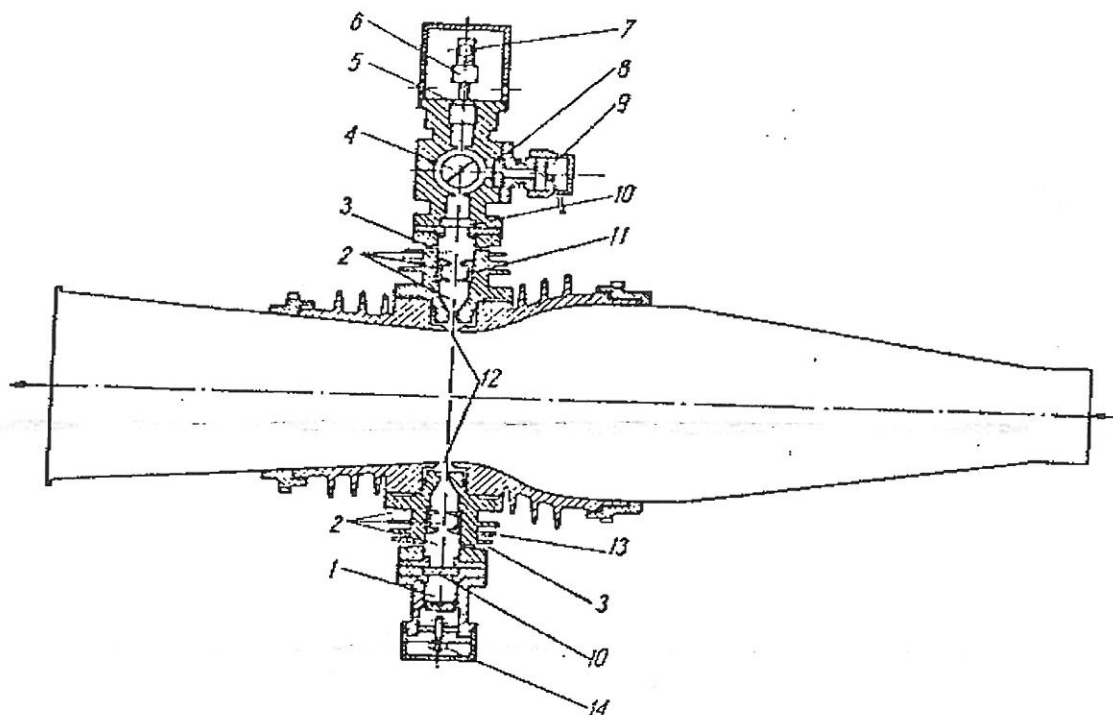
Górną granicę ustalono w celu uchronienia fotoogniwa przed nadmiernym nagraniem, które mogłoby spowodować zmianę jego charakterystyki.

Nadciśnienie spalin przy wejściu do rury pomiarowej nie może przekraczać 40 mm słupa wody. Wpływa ono bowiem na gęstość spalin, a tym samym na zawartość cząstek sadzy w jednostce objętości, a więc i na stopień ich zadymienia.



Rys.14. Przybliżona zależność pomiędzy zawartością sadzy w spalinach a zadymieniem wg skali Bosch'a i Hartridge

Na rys. 14 przedstawiono współzależność pomiędzy zawartością cząstek stałych w spalinach w mg/m a wskazaniem dymomierzy BOSCH i Hartridge (w skali liniowej). Jest to zależność przybliżona odpowiadająca „średnim” spalinom. Jak wyjaśniono na wstępie niniejszego rozdziału, stopień pochłaniania światła zależy również od wielkości cząstek sadzy (ściślej ich rozkładu), a w przypadku dymomierza BOSCH – także od własności zastosowanej bibuły filtracyjnej.



Rys.15. Schemat dymomierza Tecneco-MSA: 1 – lustro paraboliczne; 2 – komora powietrzna; 3 – wlot powietrza; 4 – lustro półprzeźroczyste; 5 – układ soczewek; 6 – oświetlacz; 7 – żarówka jodowa; 8 – gniazdo filtra do cechowania dymomierza; 9 – fotoogniwo; 10 – szklana płyta ochronna; 11 – przesłona zawirowująca przepływ; 12 – szczelina wlotowa powietrza do dyszy Venturi; 13 – żebra odprowadzające ciepło; 14 – śruba regulacji zwierciadła parabolicznego

Na rys. 15 przedstawiono schemat dymomierza Tecneco-MSA opracowanego w Istituto Motori w Neapolu i proponowanego jako typowe urządzenie pomiarowe zadymienia spalin według przepisów międzynarodowych. W dymomierzu tym cały strumień spalin emitowanych przez badany silnik przepływa przez przestrzeń pomiarową, którą stanowi najmniejszy przekrój dyszy Venturi. Strumień światła emitowanego przez oświetlacz, skondensowany przez układ optyczny, przechodzi przez ustawioną pod kątem 45° płytkę szklaną pokrytą od strony dyszy Venturi mikrowarstwą metalizowaną, następnie przecina przestrzeń pomiarową i odbity od zwierciadła parabolicznego wraca przez przestrzeń pomiarową i ulega częściowemu odbiciu we wspomnianej płytce metalizowanej, a następnie pada na fotodiodę. Układ optyczny zabezpieczony jest przed zabrudzeniem spalinami przez strumienie powietrza zasysane od strony oświetlacza i lustra parabolicznego przez niewielkie szczeliny. Niezbędną różnicę ciśnień uzyskuje się w wyniku spadku ciśnienia podczas przepływu spalin przez dyszę. Przekrój przepływowy szczelin dobrano w taki sposób, że natężenie przepływu powietrza zawiera się od 0,1 do 0,3 % natężenia przepływu spalin i nie ma praktycznie wpływu na wskazania dymomierza. Cechowanie dymomierza odbywa się za pomocą wzorcowych filtrów umieszczonych wewnątrz zwężki. Zależnie od potrzeb może być on wycechowany wg dowolnej skali (np. Hartridge, BOSCH i in). Skala jego jest liniowa jedynie w przypadku dymomierza typu Hartridge o długości pomiarowej równej dwukrotnej średnicy dyszy. W praktyce dla silników typu samochodowego i pokrewnych średnica ta jest rzędu $30 \div 40$ mm, a więc znacznie mniejsza od połowy długości rury pomiarowej dymomierza typu Hartridge, a w związku z tym skala miernika musi być nieliniowa.

Zwężka, przez którą przepływają spaliny jest zewnętrznie uźebrowana. Podobne uźebrowanie mają także kanały, którymi przepływa zasysane powietrze. Łącznie umożliwiają

one tak intensywne odprowadzanie ciepła, że wspomniany dymomierz może praktycznie pracować w sposób ciągły bez obawy przegrzania fotodiody lub układu optycznego. Omawiany dymomierz nadaje się zarówno do pomiarów w warunkach ustalonych, jak również - w odróżnieniu od uprzednio opisanych - do pomiarów w warunkach nieustalonych, gdyż cały strumień spalin przechodzi przez jego przestrzeń pomiarową i sposób poboru spalin nie wpływa na wyniki pomiaru.

W przypadku pracy silnika w warunkach nieustalonych dymomierze opisane w niniejszym podrozdziale mogą być podłączone do odpowiadających parametrów elektrycznymi rejestratorami zapisującym przebieg zmienności chwilowego zadymienia spalin.

4. Wykonanie pomiarów i obliczeń

Pomiaru zadymienia spalin dokonujemy na stanowisku hamownianym dla silnika 312C o mocy maksymalnej 22 kW uzyskiwanej przy prędkości obrotowej $n = 2200$ obr/min. Pomiarów przeprowadzamy w następujący sposób:

1. Pomiary stopnia zadymienia spalin przeprowadzamy przy stałej prędkości obrotowej silnika $n = \text{const}$.
2. Dla poszczególnych punktów pomiarowych odczytujemy wartość siły na hamulcu i stopień zadymienia spalin.
3. Kolejne punkty pomiarowe uzyskujemy zwiększając wartość obciążenia silnika za pomocą hamulca wodnego.
4. Wartość prędkości obrotowej regulujemy poprzez zmianę wielkości dawki paliwa.
5. Dla kolejnych punktów pomiarowych obliczamy:

- moc użyteczną

$$N_e = \frac{P \cdot n}{k} [\text{kW}]$$

- moment obrotowy

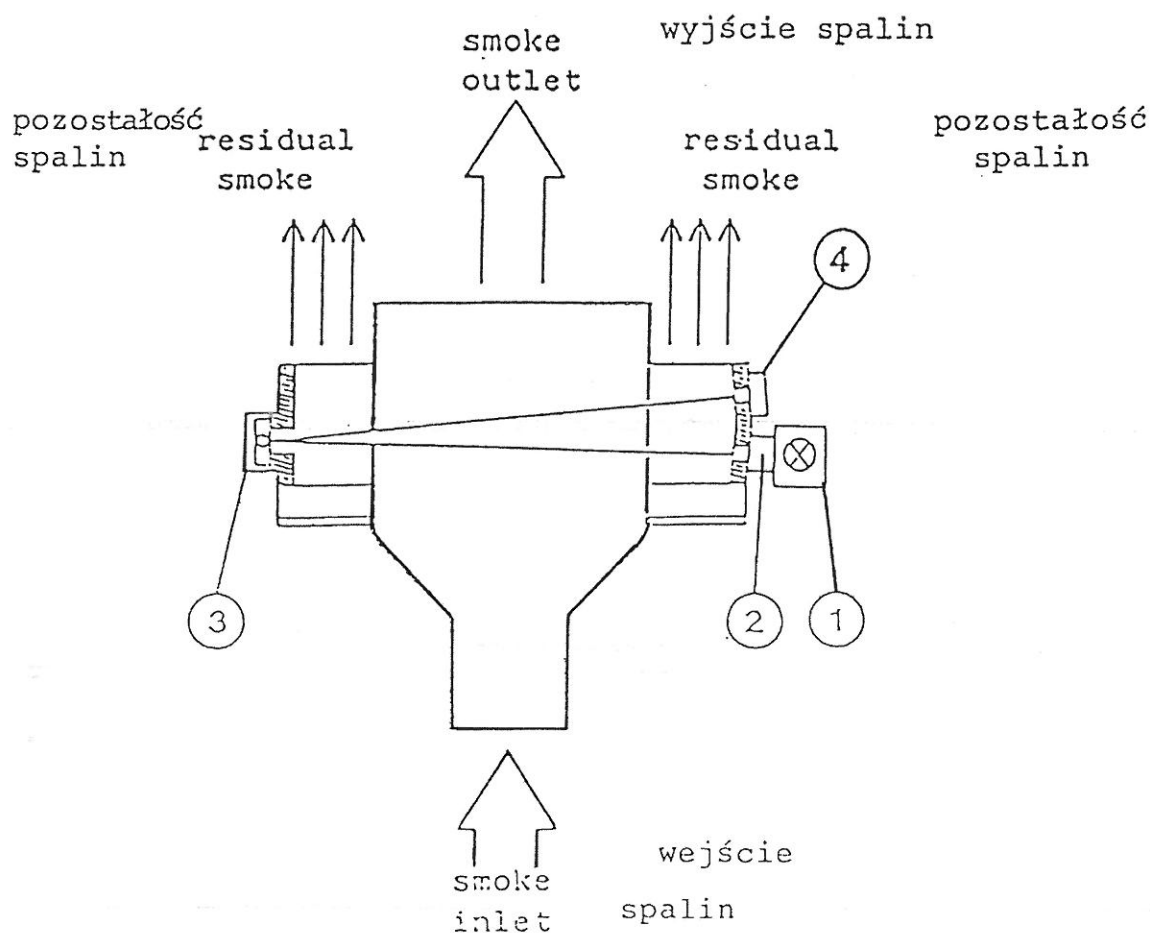
$$M_o = 9554,14 \cdot \frac{N_e}{n} [\text{Nm}]$$

- średnie ciśnienie użyteczne

$$p_e = 0,0126 \cdot \frac{M_o}{V_{ss}} [\text{MPa}]$$

W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów i przeprowadzone obliczenia należy sporządzić charakterystykę stopnia zadymienia spalin w funkcji momentu obrotowego M_o lub średniego ciśnienia użytecznego p_e .

Stopień zadymienia spalin określamy przy użyciu **pełnoprzepływowego dymomierza M-490 firmy Tecnotest** (rys. 16). Zasada działania tego dymomierza oparta jest o metodę optyczną pomiaru stopnia pochłaniania promieniowania światła przez spaliny. Promienie światła wychodzące z żarówki halogenowej 1 zostają poprzez układ optyczny 2 skoncentrowane w wiązkę promieni o średnicy ok. 10 mm. Wiązka ta przechodzi przez celę pomiarową do momentu spotkania się z lustrem 3, które odbija ją na komórkę fotoczułą 4. W przegrodach po obu stronach celi pomiarowej działa wentylacja z czystym powietrzem celem zapobiegania osiadaniu zanieczyszczeń z spalin na elementach optycznych, co spowodowałoby zafałszowanie wyników. Sygnały przekazane przez układ optyczny są przeanalizowane i wyświetlane w układzie elektronicznym, który przy pomocy mikroprocesora zapamiętuje wartości pomiarowe. Wynik pomiaru jest określany w skali od 0 do 100 % z dokładnością do 1 %.



Rys. 16. Schemat ilustrujący zasadę działania pełnoprzepływowego dymomierza M-490 włoskiej firmy Tecnotest.

5. Wnioski

Wnioski z ćwiczenia powinny dotyczyć uzyskanych wyników pomiaru zadymienia spalin silnika w zależności od jego obciążenia przy stałej prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

6. Literatura

1. Bernhardt M., Michałowska J., Radzimirski S.: Motoryzacyjne skażenie powietrza. WKiŁ Warszawa 1976.
2. Gronowicz J.: Ochrona środowiska w transporcie lądowym. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Poznań – Radom 2004.
3. Merksiz J.: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
4. Merksiz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Tom I. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
5. Niewiarowski K.: Tłokowe silniki spalinowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
6. Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
7. Instrukcja obsługi dymomierza pełnoprzepływowego M-490 firmy Tecnotest.

