

INSTYTUT. BADAŃ JĄDROWYCH
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
INSTITUTE OF NUCLEAR RESEARCH

1004460
INR - 1760 /XX/I/B

**IZOTOPOWA METODA WYZNACZANIA
BEZWZGLĘDNYCH WARTOŚCI
ZUŻYCIA PIERŚCIENI TŁOKOWYCH
SILNIKÓW WYSOKOPRĘŻNYCH**

**G. Żukowska-Ćwik
J. Kraś
Z. Banasik**

Warszawa 1978

**INSTYTUT BADAŃ JĄDROWYCH
ZAKŁAD JĄDROWYCH METOD INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

**IZOTOPOWA METODA WYZNACZANIA BEZWZGLĘDNYCH WARTOŚCI
ZUŻYCIA PIERŚCIENI TŁOKOWYCH SILNIKÓW WYSOKOPRĘŻNYCH**

**DETERMINATION OF THE TOTAL WEAR OF PISTON RINGS
IN DIESEL ENGINES BY MEANS OF RADIOISOTOPIC METHODS**

**РАДИОИЗОТОПНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ВЕЛИЧИН ИЗНОСА
ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ**

**GABRIELA ŻUKOWSKA-ĆWIK
JANUSZ KRAŚ
ZBIGNIEW BANASIK**

**Instytut Badań Jądrowych, Zakład Jądrowych Metod Inżynierii
Materiałowej, ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa, Polska**

WARSZAWA 1978

Streszczenie

W raporcie przedstawiono sposób wyznaczania bezwzględnych wartości zużycia pierścieni tłokowych silników wysokoprężnych w stanowiskowych badaniach izotopowych. Opisano wyniki badań wstępnych i sprawdzających. Stwierdzono, że po 25 godz. pracy silnika na stanowisku hamowniczym (2200 obr/min, P=80 kG) masa cząstek zużycia przechodzących do spalin z pierścieni chromowanych stanowi 25 % ich zużycia całkowitego. W takim samym okresie, z drugiego i trzeciego pierścienia uszczelniającego bezpośrednio do spalin przechodzi poniżej 3 %. Wyniki te mają istotne znaczenie dla projektowania i przeprowadzania izotopowych badań zużycia, mających na celu prognozowanie trwałości badanych elementów.

Abstract

This report presents the radioisotopic method of evaluation of piston rings wear in diesel engines in rig test. The results of the preliminary and test investigations are given. It was stated that during the first 25 hours of rig test of engine (2200 rpm, P=80 kG) about 25 % of total wear particles belonged the first chromium plated piston ring are combusted. In the same period there was found in combustion gases less than 3 % of wear particles of the second and third piston rings origination. These results are of great importance in the radioisotopic programming and carrying out investigations for the prognosis of the tested elements durability.

Резюме

В отчете представлен способ определения абсолютных величин износа поршневых колец Дизельных двигателей внутреннего сгорания в стендовых изотопных исследованиях. Описаны результаты предварительных и проверочных исследований. Обнаружено, что после 25 часов работы двигателя на тормозной установке (2200 вращ. обор./мин. нагрузка 80 кг), вес частиц износа переходящих из хромированных колец непосредственно в продукты сгорания, составляет 25 % их полного износа. За такое же время из второго и третьего компрессионного кольца, непосредственно в продукты сгорания переходит менее чем 3%. Результаты эти имеют существенное значение для проектирования и проведения радиоизотопных исследований износа целью которых является прогнозирование прочности исследуемых элементов.

1. WSTĘP

Podniesienie własności użytkowej silników, przedłużenie ich przebiegów międzyremontowych, związane jest z koniecznością doboru materiałów pod względem odporności na zużycie, szczególnie w odniesieniu do tych części, których praca decyduje o trwałości.

W badaniach, prowadzonych w laboratoriach przemysłowych, do określania zmian wymiarów elementów najczęściej stosowana jest metoda mikrometryczna. Wymaga ona wykonania pomiarów elementów przed ich montażem w silniku, pracy silnika na hamowni lub w warunkach normalnej eksploatacji w ciągu setek godzin, następnie demontażu i powtórnego określania wymiarów. Konieczność długotrwałej pracy wynika z niskiej czułości metody. Ponadto stosowanie jej nie daje żadnych informacji o przebiegu zużycia elementów w funkcji czasu pracy. Badanie wpływu czynników technologicznych wymaga powtarzania długich cykli pracy odpowiednio dla każdej wprowadzanej zmiany parametrów.

Konieczność skrócenia cykli pomiarowych przy jednoczesnym rozszerzeniu zakresu badań zdecydowała o wykorzystaniu metody atomów znaczonych do określania wartości zużycia. Badania takie prowadzono w Zakładzie Doświadczalnym Fabryki Samochodów Ciężarowych w Starachowicach pod kierunkiem i przy współudziale Pracowni Metod Inżynierii Mechanicznej Zakładu Zastosowań Izotopów w Metalurgii i Technologii Metali Instytutu Badań Jądrowych.

Niniejsza praca dotyczy badań, prowadzących do ustalenia sposobu postępowania przy określaniu bezwzględnych wartości zużycia pierścieni tłokowych.

Stosowana uprzednio [1-3] metodyka prowadzenia badań zużycia i opracowania wyników oparta była na założeniu, że wszystkie produkty, starte z warstw wierzchnich badanych elementów, przechodzą do oleju smarującego, zostają w nim równomiernie wymieszane i razem z nim ulegają spalaniu. Założenia te są słuszne w odniesieniu do części silników nie stykających się bezpośrednio ze spalinami. Natomiast znaczną część cząstek zużycia, pochodząca z takich elementów jak pierścienie tłokowe, tuleje cylindrowe, zawory i prowadniki zaworowe itp. przechodzi bezpośrednio do gazów spalinowych. Toteż, aby wyznaczyć metodą izotopową bezwzględne wartości zużycia np. pierścieni tłokowych znakowanych radionuklidem, konieczne jest:

- określenie masy znakowanego materiału, którą z warstwy wierzchniej badanego pierścienia przechodzi bezpośrednio do spalin,

- określenie w bilansie cząstek zużycia udziału masy cząstek zużycia usuwanej ze spalinami i jej wpływu na sumaryczne wartości zużycia.

Jest to szczególnie ważne ze względu na szerokie możliwości praktycznego wykorzystania wyników badań.

Jednym z wykładników stanu technicznego silnika jest stopień zużycia pierścieni tłokowych. Nadmierne zużycie pierścieni powoduje zwiększone spalanie oleju, zmniejszenie stopnia sprężania, obniżenie użytecznej mocy silnika. Zużycie pierścieni tłokowych może być również wykładnikiem zużycia innych części silnika, np. tulei cylindrowych [3-6].

Dotychczas izotopowe badania zużycia części silnika przeprowadzane były w celu określenia:

- a) wpływu rodzaju oleju smarującego na intensywność zużycia wybranych części silnika [3,6],
- b) wpływu parametrów pracy silnika na zużywanie się pierścieni tłokowych [7],
- c) wpływu środków docierających na skrócenie czasu docierania [8],
- d) skuteczności działania układów filtracji oleju i powietrza [9],
- e) intensywności zużywania się współpracujących ze sobą pierścieni tłokowych i tulei cylindrowej [10].

We wszystkich tych badaniach głównym źródłem informacji były wyniki pomiarów częstości zliczeń od cząstek zużycia, pochodzących z warstw wierzchnich pierścieni znakowanych izotopami promieniotwórczymi i transportowanych przez olej smarujący.

Wysoka czułość metody izotopowej pozwala na ograniczenie czasu trwania poszczególnych cykli pomiarowych do kilkunastu, najwyżej kilkudziesięciu godzin pracy silnika. Tak np. do określenia intensywności zużycia pierścieni tłokowych przy stosowaniu czterech gatunków oleju smarującego wystarczyło 4x20 godzin pracy silnika na hamowni. Badania eksploatacyjne wymagały przebiegów 2-3 tys.km, ze względu na konieczność uśrednienia zmian warunków pracy silnika, wynikających z różnych sytuacji w ruchu kołowym na drogach.

Celem niniejszej pracy było opracowanie i praktyczne sprawdzenie metody oznaczania wartości zużycia wybranych części silników spalinowych z uwzględnieniem strat cząstek zużycia przechodzących do spalin, a więc metody pozwalającej na bilansowanie produktów zużycia.

Ma to szczególne znaczenie przy porównywaniu wpływu parametrów eksploatacyjnych na zużycie części różnych silników oraz przy ocenie jakości nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych silnika.

Opisane poniżej badania dotyczą jedynie pierścieni tłokowych, lecz metoda badań może zostać zastosowana również do oznaczania zużycia elementów rozrządu silnika, tulei cylindrowych itp.

2. PRZYGOTOWANIE BADAŃ

2.1. Przygotowanie stanowiska badawczego

Zamontowany na stanowisku w pomieszczeniu przystosowanym do pracy z izotopami w ZDFSC Starachowice silnik wysokoprężny S-359 wyposażono w zmodyfikowany układ wydechowy, pozwalający na pobieranie spalin ze skrajnej głowicy (pierwszej lub trzeciej). Podstawowa trudność, tj. sposób reprezentatywnego pobierania próbek z dużych objętości spalin, została rozwiązana poprzez wykonanie urządzenia opartego na filtrze cyklonowym, w którym następuje wytrącanie cząstek zużycia z gazów spalinowych. Zaletą tego urządzenia jest możliwość wykorzystania całkowitej objętości spalin wychodzących z jednej głowicy (2-ch cylindrów) przy minimalnym zwiększeniu dynamicznego oporu przepływu.

Przeprowadzone wcześniej próby [7] pomiarów częstości zliczeń i oznaczanie zawartości znacznika w spalinach, były oparte na wykorzystaniu małych objętości, ok. 1% całości powstających gazów, a więc o niskiej zawartości cząstek zużycia. W związku z tym konieczne było napromienianie elementu badanego (pierścienia tłokowego) do uzyskania znacznej aktywności. Wytrącanie cząstek zużycia z całej objętości spalin pozwala stosować aktywności 10-krotnie niższe. Schemat układu przedstawiono na rys.1.

Oznaczano również zawartość cząstek zużycia w oleju smarującym. W tym celu w misce olejowej silnika wmontowano kran, pozwalający na pobieranie próbek oleju bezpośrednio do naczyń pomiarowych. Ponadto za układem filtrów wyprowadzono przewody olejowe do stanowiska, umożliwiającego ciągły pomiar częstości zliczeń od zawartych w oleju cząstek zużycia z napromieniowanych części (rys. 2). Między naczyniem olejowym a kryształem scyntylacyjnym umieszczony został płaszcz wodny, konieczny dla zapewnienia prawidłowej pracy sondy.

2.2. Aparatura pomiarowa

Oprzyrządowanie stanowiska na hamowni pozwalało zmierzyć parametry pracy silnika takie jak:

- prędkość obrotowa wału korbowego,
- obciążenie,
- temperaturę wody chłodzącej i oleju smarującego,
- ciśnienie oleju,
- temperaturę spalin na wylocie kolektora wydechowego.

Do pomiarów radiometrycznych używano sond scyntylicyjnych, z przelicznikiem PT67 sterowanym czasosterelem. Pomiar częstości zliczeń w przepływie ciągłym oleju prowadzono przy użyciu integratora z wyjściem na rejestrator.

Sondy umieszczone były w ołowianych domkach pomiarowych o grubości ścianek 5 cm. Stanowiska pomiarowe znajdowały się w odległości ~ 6 m od silnika w osobnym pomieszczeniu.

Optymalne warunki pracy aparatury pomiarowej dobrane były odpowiednio do energii fotonów γ emitowanych przez stosowany izotop promieniotwórczy [11].

2.3. Wyznaczanie efektywności filtru cyklonowego

Wyznaczanie efektywności wychwytywania przez filtr cyklonowy cząstek zużycia ze spalin przeprowadzono przez dozowanie aktywnych pyłów do strumienia spalin bezpośrednio za wylotem z głowicy silnika. Pomiar promieniotwórczości znacznika zatrzymanego w osadniku przeprowadzono co pół godziny pracy silnika w ciągu trzech godzin od momentu dozowania. Efektywność η_0 wyznaczano jako stosunek częstości zliczeń promieniowania znacznika zebranego w osadniku filtra do częstości zliczeń promieniowania znacznika wprowadzanego do spalin, z uwzględnieniem różnic związanych ze zmianą geometrii pomiaru.

Zmiany efektywności wychwytu w zależności od czasu pobierania próbki ze spalin przedstawione są na rys.3. Przy wybranych warunkach pracy silnika (1700 obr/min; 75 kG) i pobieraniu próbek w ciągu 2-ch godzin pracy silnika, efektywność wychwytu wyniosła 15,2%. Przedłużenie czasu pobierania próbki nie powoduje dalszego wzrostu efektywności.

Opisany sposób cechowania jest poprawny w przypadku badania zużycia przewodników zaworowych lub zaworów wydechowych, gdy

praktycznie 100% produktów zużycia przechodzi do spalin. W badaniach innych elementów silnika, a zwłaszcza pierścieni tłokowych, mechanizm przechodzenia cząstek zużycia do spalin jest bardziej złożony. W czasie pracy silnika występują warunki, przy których mogą przechodzić bezpośrednio do spalin cząstki zużycia, namazywane w czasie ruchów tłoka na wewnętrzne ściany tulei. Część cząstek przedostaje się do kolektora wydechowego łącznie z produktami spalania oleju smarującego. W związku z tym konieczne były badania uzupełniające dla określenia zachowania się w czasie pracy silnika izotopów metali wprowadzonych do układu smarowania.

3. PRZEBIEG BADAŃ BILANSOWANIA AKTYWNOŚCI OLEJU

3.1. Wprowadzanie aktywnych znaczników do oleju

Wstępne badania przeprowadzono wprowadzając do oleju znaczniki promieniotwórcze o znanej aktywności. Umożliwiło to precyzyjne oznaczenie strat aktywności wskutek spalania się oleju silnikowego w funkcji warunków pracy silnika.

Do znakowania olejów najczęściej stosowane są roztwory i związki zawierające siarkę ^{35}S lub fosfor ^{32}P oraz koloidalne roztwory złota ^{198}Au [12]. Siarka i fosfor nie są odpowiednie do stosowania w badaniach zużycia zarówno ze względów radiometrycznych (emitują wyłącznie promieniowanie beta) jak i z powodu występowania przy dużych naciskach i wysokich temperaturach reakcji z metalami. Złoto natomiast praktycznie nie przechodzi do spalin. Ponadto najbardziej wskazane wydawało się wprowadzanie tych izotopów promieniotwórczych, które stosuje się do znakowania elementów w badaniach zużycia. W tym celu opracowano sposób przeprowadzania w kompleksy metaloorganiczne takich znaczników jak ^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{110m}Ag . Szczególnie dobre własności, tzn. wysoką stabilność i niskie straty w czasie operacji chemicznych, wykazuje cynk, występujący również jako składnik w dodatkach do olejów.

Kompleks żelaza wykazuje nieco mniejszą stabilność; należy go przygotować bezpośrednio przed projektowanym stosowaniem. Porcję znakowanego kompleksu metaloorganicznego wprowadzano pipetą do oleju odmierzonego w naczyniach pomiarowych, następnie mierzono częstość zliczeń promieniowania i znakowaną porcję wlewano do obiegu smarowania. Uruchomienie i praca silnika w ciągu około pół godziny pozwalała uzyskać pewność zupełnego wymieszania z olejem będącym w obiegu.

Częstość zliczeń rejestrowana za pomocą integratora wzrastała gwałtownie i już po upływie kilku minut utrzymywała się na stałym poziomie.

Zmianę aktywności próbek olejowych w funkcji aktywności wprowadzanego znacznika przedstawiono na rys.4.

Uzyskane wyniki potwierdzają spodziewaną równomierność wymieszania kompleksów metaloorganicznych w oleju, a ponadto pozwalają określić ściślej objętość oleju w obiegu smarującym metodą rozcieńczenia izotopowego. Wymieszanie znacznika w oleju następuje w ciągu kilku minut pracy silnika. Zachowana jest prosta proporcjonalność między aktywnością wprowadzoną a stężeniem aktywności w oleju.

3.2. Bilansowanie aktywności oleju

Badania, prowadzące do ustalenia rozdziału aktywności między olej i spaliny, prowadzono przy znakowaniu oleju kompleksami metaloorganicznymi ^{59}Fe lub ^{65}Zn , utrzymując stałe warunki pracy silnika. Cykl pomiarowy wynosił 2 godz. pracy przy obciążeniu 75 kG i 1700 obr/min. Po zakończeniu cyklu określano aktywność oleju pobranego z miski olejowej oraz aktywność pyłu zebranego w filtrze cyklonowym. Seria pomiarowa obejmowała kilka lub kilkanaście cykli pracy, koniecznych do zaobserwowania i określenia ubytku oleju przez uzupełnienie znaną objętością do poziomu pierwotnego.

Aktywność względną całkowitą, która powinna być równa aktywności wprowadzanej, określano z następujących zależności ogólnych

$$N_c = N_o + N_{uo} \quad (1)$$

oraz

$$N_c = N_o + N_{sp} \quad (2)$$

gdzie:

N_c - aktywność wprowadzana, [imp/min]

N_o - aktywność oleju w obiegu, [imp/min]

N_{uo} - straty aktywności w ubytkach olejowych [imp/min],

N_{sp} - straty aktywności ze względu na przechodzenie znacznika do spalin [imp/min].

Aktywność wprowadzana N_c ustalana była w oparciu o częstość zliczeń ze znakowanego kompleksu, zmierzona w takiej geometrii, jaką stosowano przy pomiarze próbek olejowych.

Aktywność oleju N_o określano uwzględniając stosunek objętości mierzonej próbki - V_p do objętości oleju smarnego w silniku V_o

$$N_o = N_p \cdot \frac{V_o}{V_p} \quad (3)$$

gdzie

N_p - średnią częstość zliczeń znacznika zawartego w próbce pomiarowej [imp/min].

Straty aktywności ze względu na ubytki oleju określano z zależności

$$N_{uo} = \sum_{i=1}^n N_{pi} \cdot \frac{V_{ui}}{V_p} \quad (4)$$

gdzie

V_{ui} - objętość ubytku równała się objętości oleju użytego do uzupełnienia do stałego poziomu [cm³]

n - liczba cykli pomiarowych.

W obliczeniach uwzględniono średnie ubytki oleju po każdym cyklu, sumując straty z poprzednich cykli pomiarowych.

Straty aktywności w spalinach określano na podstawie pomiarów częstotliwości zliczeń promieniowania cząstek znacznika, zebranych w ciągu cyklu pracy w osadniku cyklonu - N_{pci} , uwzględniając fakt pobierania 1/3 spalin (z jednej głowicy) i sprawność cyklonu wyznaczoną przy dozowaniu pyłów (p. 2.3). Współczynnik przeliczeniowy pozwalający uwzględnić zmianę geometrii pomiaru "naczynie olejowe - osadnik cyklonu" dla Fe-59 i Zn-65 był równy jedności. Tak więc

$$N_{sp} = \sum_{i=1}^n 3 \cdot \frac{N_{pci}}{\eta} \quad (5)$$

gdzie

N_{pci} - częstość zliczeń promieniowania cząstek znacznika, zebranych w osadniku w kolejnym cyklu pracy, [imp/min],

$\eta = 15,2$ % (efektywność wychwytu znacznika ze spalin).

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń zawarte jest w tablicach 1 i 2 oraz przedstawione graficznie na rys.5.

Aktywności całkowite N_C wyznaczone po każdym cyklu pracy silnika mają praktycznie stałą wartość dla przypadków znakowania kompleksami metaloorganicznymi. Różnice między wartościami uzyskanymi z przeliczeń wg zależności (1) i (2) wynikają bądź z zaniżenia efektywności wychwytu, bądź występowania obok spalania również niekontrolowanych wycieków oleju.

Bilansowanie aktywności znaczników (wprowadzonych do oleju w postaci kompleksów metaloorganicznych) wykazało, że występuje proporcjonalność między stratami znacznika i objętością spalanego oleju. Wartości globalnych aktywności względnych wyliczonych wg zależności (1) i (4), tzn. przy uwzględnieniu ubytków oleju nie różnią się w sposób istotny od wartości wyliczonych na podstawie zależności (2) i (5), w których straty aktywności określane są na podstawie pomiarów radiometrycznych znacznika, zebranego w osadniku cyklonu.

Średnie wartości względnych aktywności globalnych, zestawionych w kolumnach 6 i 7 tabeli 1 (znakowanie kompleksem metaloorganicznym ^{65}Zn), różnią się mniej niż o 0,5% przy różnicach między odpowiednimi wartościami pośrednimi, nie przekraczającymi 2%.

Wyniki badań bilansowania aktywności względnych ^{59}Fe zestawione są w tabeli 2. Różnica średnich wartości zestawionych w kolumnach 6 i 7, wyznaczonych analogicznie jak podano powyżej dla ^{65}Zn , nie przekracza 4% i tego samego rzędu różnice występują między odpowiednimi wartościami pośrednimi.

Sumaryczne straty aktywności, wyznaczone na podstawie zależności (4), są niższe od strat wyznaczonych wg zależności (5) w oparciu o pomiary radiometryczne znacznika zebranego w osadniku.

3.3. Badanie efektywności i wychwytu znaczników w cyklonie

Znakowanie oleju kompleksami metaloorganicznymi zapewnia równomierny rozkład znacznika w oleju i proporcjonalność między stratami aktywności i spalaniem oleju. Dzięki temu jest możliwe ustalenie zależności między warunkami pracy silnika a efektywnością wychwytu znacznika ze spalin. Przeprowadzono badania przy stałej prędkości obrotowej i zmiennych obciążeniach oraz przy stałym obciążeniu i różnych wartościach obrotów. Badania przeprowadzone były dla oleju znakowanego roztworem kompleksu Zn-^{65} . Cykl pomiarowy obejmował godzinę pracy

silnika i pół godziny postoju, w czasie którego były pobierane, mierzone i wlewane ponownie do silnika próbki olejowe. Wymieniano również naczynie osadnika cyklonu. Pomiary radiometryczne znacznika zgromadzonego w osadniku wykonywano po czasie potrzebnym do wystudzenia naczynia do temperatury pokojowej. Stałe warunki pracy silnika utrzymywano w ciągu kolejnych 3-ch cykli pomiarowych.

Serię pomiarów prowadzono przy zmniejszaniu obciążenia od 80 kG do kolejno 60, 40 i 20 kG. Analogiczny tryb postępowania przyjęto przy badaniach zależności między efektywnością wychwytu znacznika w cyklonie a prędkością obrotową wału głównego silnika. Badanie prowadzono przy stałym (80 kG) obciążeniu silnika po trzy cykle pomiarowe przy stałych wartościach 1000, 1300, 1600, 1900, 2200 i 2500 obr/min. Na rys.6 przedstawiony jest charakter wpływu zmian obciążenia na względną wydajność cyklonu.

W celu uniknięcia błędów w ocenie ilości spalonego oleju, rzędne punktów wyznaczone są jako średnie ze stosunku częstości zliczeń promieniowania znacznika zebranego w osadniku cyklonu do częstości zliczeń znacznika zawartego w próbce olejowej. Występuje zasadnicza różnica w charakterze przebiegu zmian. W czasie pracy silnika przy 1600 obr/min występuje gwałtowne zmniejszenie się zawartości znacznika w osadniku wraz ze zmniejszaniem obciążenia silnika. Przy prędkości 2200 obr/min wpływ zmiany obciążenia jest znacznie mniejszy. Wraz ze zmianami obciążenia i obrotów zmieniają się objętości spalanego oleju i jakkolwiek rzeczywiste wartości efektywności mogą się znacznie różnić od wartości względnych, to charakter zmian będzie podobny.

Na rys.7 podana jest zależność między względną wydajnością cyklonu, a prędkością obrotową wału silnika przy stałym obciążeniu (80 kG). Naniesione punkty średniej efektywności cyklonu wyliczone są z uwzględnieniem objętości spalonego oleju wg wzoru

$$\eta_c = \frac{3 \cdot N_{sp}}{N_{po}} \cdot \frac{V_{po}}{V_{uo}} \quad (6)$$

gdzie

$$N_{po} \cdot \frac{V_{uo}}{3 V_{po}}$$

η_c - efektywność cyklonu,
 N_{sp} - aktywność znacznika wychwyconego ze spalin,
 - aktywność znacznika zawartego w spalonej objętości oleju.

Badanie efektywności wychwytu znacznika ze spalin (η_c) miało na celu określenie charakteru zmian jego wartości w zależności od parametrów pracy silnika. Jak wynika z rezultatów przeprowadzonych pomiarów, gromadzenie się znacznika w osadniku cyklonu jest ściśle związane z warunkami pracy silnika. Przy niskich obrotach i małym obciążeniu zużycie paliwa jest niewielkie, powstaje mała ilość spalin, ich szybkość przepływu może być niewystarczająca aby zapewnić pełny transport cząstek zużycia do cyklonu. Znaczna ich część może osiadać na ściankach przewodu doprowadzającego spaliny z głowicy. Przy wzroście objętości produkowanych spalin, gdy zwiększą się obroty silnika lub obciążenie, rośnie również prędkość liniowa przepływu spalin i ich temperatura, więcej cząstek stałych dociera do cyklonu i osadza się na jego ściankach. Dalszy wzrost prędkości przepływu spalin może powodować występowanie niekorzystnych wirów i częściowo ponowne porywanie cząstek stałych zebranych w osadniku. Fakt ten jest niewątpliwą wadą urządzenia. W warunkach niestabilnej pracy silnika należałoby stosować dwa lub więcej cyklonów połączonych szeregowo.

4. OZNACZANIE BILANSU ZUŻYCIA PIERŚCIENI

4.1. Aktywacja pierścieni tłokowych

Pierścienie tłokowe silnika S-359 ϕ 110 mm - mogą być napromieniane w całości w wodnym kanale reaktora "EWA". Czas napromieniania w kanale specjalnym stanowić może tylko wielokrotność czasu trwania cyklu pracy reaktora. Obliczenia wstępne poparte doświadczeniami z wcześniejszych badań, dotyczących współpracy pierścienia i tulei, pozwoliły ograniczyć czas napromieniania pierścieni chromowanych do jednego tygodnia pracy reaktora. Przy wykorzystaniu 2-ch pierścieni chromowanych czułość pomiaru wartości zużycia liniowego wynosiła $\leq 0,05 \mu\text{m}$. Znakowanie pierścieni żeliwnych musiało trwać nieco dłużej. Właściwy czas napromieniania pierścieni żeliwnych w kanale reaktora "EWA" wynosi 4 tygodnie; uzyskuje się wówczas stężenie aktywności $^{59}\text{Fe} \sim 0,1 \text{ mCi/g}$ żeliwa. Przy skróceniu czasu przebywania w reaktorze do 2 tygodni i wykorzystaniu 4 aktywnych pierścieni do badań, czułość metody oznaczania średnie; wartości zużycia liniowego wynosi zaledwie około 2 μm .

Pierścienie tłokowe napromieniano w pojemnikach wykonanych z tarnamidu.

W izotopowych badaniach zużycia nie określa się aktywności bezwzględnych. Zawartość znakowanego materiału w próbkach pomiarowych wyznacza się przez porównanie ich częstości zliczeń z częstością zliczeń wzorców. Wzorce takie są wykonane z roztworów zawierających znane stężenia metalu znakowanego.

4.2. Wzorcowanie aparatury

W izotopowych badaniach zużycia zawartość zaznakowanego materiału w próbkach pomiarowych określa się na podstawie wykresów skalowania aparatury roztworami o znanych stężeniach znakowanego metalu. Ponadto uwzględnia się zmianę aktywności w czasie i ewentualne wahania efektywności zestawów pomiarowych.

Materiał wzorców musi mieć skład chemiczny identyczny jak element napromieniony i identyczną aktywność właściwą. Uzyskuje się to w ten sposób, że znaną masę interesującego materiału napromienia się we wspólnym opakowaniu z elementem przygotowywanym do badania.

W przypadku pierścieni chromowanych materiał na wzorce stanowi spektralnie czysty chrom o masie kilkunastu gramów. Przy napromienieniu pierścieni żeliwnych wzorców przygotowywany był z materiału tego elementu.

Napromienione wzorce rozpuszcza się w znanych objętościach kwasów.

Skalowanie filtrów dokładnego oczyszczania przeprowadza się przez pomiar wkładów papierowych nasączonych znanymi objętościami roztworów wzorcowych w takiej samej geometrii, w jakiej mierzone są filtry pracujące w silniku w czasie badań.

4.3. Badania zużycia pierścieni tłokowych chromowanych

Pierścienie tłokowe chromowane mają za zadanie uszczelnianie komory spalania. Umieszczone są najbliżej denka tłoka i mają bezpośredni kontakt z gorącymi gazami spalinowymi w suwie pracy i wydechu. Stąd duże prawdopodobieństwo przechodzenia tylko części cząstek zużycia do oleju, podczas gdy pozostała część przechodzi bezpośrednio do spalin.

W celu ilościowego ujęcia tego zjawiska, przeprowadzono kilka serii pomiarów. Aktywne pierścienie montowano na tłokach jednej głowicy skrajnej. Układ wydechowy, zmodyfikowany w ten sposób,

że próbki spalin mogą być pobierane z pierwszej lub trzeciej głowicy, montowany był kolejno w obu wersjach. To znaczy w ciągu kilkunastu godzin pracy silnika próbki spalin pobierane były z głowicy, gdzie pracowały pierścienie napromienione, a następnie po przemontowaniu układu pobierano próbki z tej głowicy, gdzie nie było napromienionych pierścieni. W tym ostatnim przypadku cząstki znakowane zbierając się w osadniku cyklonu mogły pochodzić tylko z oleju. Uwzględniając więc sprawność cyklonu, wyniki pomiarów promieniowania próbek wzorcowych i znacznika zebranego w osadniku, można wyznaczyć masę aktywnego materiału przechodzącego do spalin z oleju:

$$m_{os} = k \cdot \frac{N_c}{\eta_c} \cdot \frac{n_w}{N_w} \quad (7)$$

gdzie

- m_{os} - masa aktywnego materiału przechodząca z oleju do spalin [μg]
- k - współczynnik przeliczeniowy wynikający z różnicy geometrii pomiaru próbki wzorcowej w penicylinówce i w naczyniu osadnika
- N_c - częstość zliczeń promieniowania znacznika zebranego w osadniku cyklonu [imp/min]
- N_w - częstość zliczeń promieniowania znacznika zawartego w próbce wzorcowej [imp/min]
- m_w - masa wzorca [μg]
- η_c - efektywność wychwytu znacznika ze spalin.

Przy pobieraniu próbek ze spalin z głowicy, w której pracują napromienione pierścienie, zawartość materiału znakowanego w osadniku cyklonu była większa, niż wynikałoby to ze spalania oleju ze względu na bezpośrednie przechodzenie znacznika do spalin:

$$m_s = m_{os} + m_{ps} \quad (8)$$

m_s - masa materiału znakowanego w porcji spalin z głowicy z aktywnymi pierścieniami [μg],

w tym:

- m_{os} - masa pochodząca ze spalania oleju smarującego z aktywnymi cząstkami [μg],

m_{ps} - masa cząstek zużycia przechodząca do spalin bezpośrednio z pierścieni [μg].

Ponieważ nie było możliwości jednoczesnego pobierania próbek z obu głowic (z napromienionymi i niemapromienionymi pierścieniami) masę zużycia według (8) określano na podstawie zawartości chromu ^{51}Cr w trzeciej części (jedna głowica) średnich ubytków olejowych.

$$m_{os} = \frac{1}{3} k \cdot \frac{N_{po}}{N_w} \cdot m_w \cdot \frac{V_{uo}}{V_{po}} \quad (9)$$

gdzie:

N_{po} - częstość zliczeń od próbki olejowej,

V_{po} - objętość próbki olejowej [cm^3],

V_{uo} - objętość średniego ubytku oleju w ciągu 1 cyklu pracy wyliczona metodą najmniejszych kwadratów [cm^3],

N_w - częstość zliczeń od próbki wzorcowej [imp/min],

m_w - masa znacznika w próbce wzorcowej [μg],

k - współczynnik pozwalający uwzględnić różnice geometrii pomiaru.

Wartość " m_s " była określana analogicznie jak " m_{os} " wg zależności (7).

Obliczenia przeprowadzone w oparciu o powyższe wzory i założenia dla 22 cykli pomiarowych pozwoliły ustalić, że cząstki przechodzące bezpośrednio do spalin z pierścieni chromowanych stanowią $a = 55,96\%$ zawartości cząstek zużycia w spalinach. Wartość ta jest prawdziwa dla utrzymywanych w czasie badań stałych warunków pracy silnika (2200 obr/min; $p = 80 \text{ kG}$).

W tabeli 3 zestawiono wyniki badań zużycia pierścieni chromowanych, obliczone według zależności stosowanych w badaniach wcześniejszych [1] oraz z uwzględnieniem pomiarów próbek ze spalin, obliczone wg wzoru:

$$M_{pj} = k \frac{N_{pj}}{N_{wj}} \cdot m_w \cdot \frac{V_o}{V_{po}} + \sum_{j=2}^{j-1} k \cdot \frac{N_{pj-1}}{N_{wj}} \cdot m_w \cdot \frac{V_{ik}}{V_{po}} + \frac{N_{pf}}{N_{wf}} \cdot m_{wf} \quad (10)$$

gdzie:

- M_{pj} - masa cząstek po j-tym cyklu pomiarowym [μg];
 k - współczynnik zmiany geometrii "próbka olejowa - wzorzec",
 N_{pf} - wynik pomiaru częstości zliczeń filtru [imp/min],
 n_{wf} - masa znacznika na filtrze wzorcowym [μg],
 N_{wf} - częstość zliczeń filtru ze wzorcem [imp/min],
 N_{pj} - wynik pomiaru częstości zliczeń znacznika z próbki oleju po j-tym cyklu [imp/min],
 N_{wj} - wynik pomiaru częstości zliczeń znacznika z próbki wzorca po j-tym cyklu [imp/min],
 m_w - masa wzorca [μg],
 V_o - objętość oleju smarnego w silniku [cm^3],
 V_{po} - objętość próbki olejowej [cm^3],
 V_u - objętość uzupełnień oleju [cm^3],
 m_{fj} - $N_{pf}/N_{wf} \cdot m_{wf}$ - masa materiału znacznika na filtrze [μg].

W kolumnie 6 tabeli 3 zestawiono wyniki, w których uwzględniono poprawkę na bezpośrednie przechodzenie chromu do spalin według zmodyfikowanej zależności (7)

$$m_{ps} = k \cdot \frac{N_c}{\eta_c} \cdot \frac{m_w}{N_w} \cdot a \quad (11)$$

gdzie:

- a - udział cząsteczek zużycia przechodzących bezpośrednio do spalin.

Masa cząsteczek zużycia [M'_{pj}] po cyklu "j" określana jest następującą zależnością ogólną:

$$M'_{pj} = M_{oj} + 3 \sum_{j=1}^j m_{osj} + \sum_{j=1}^j m_{psj} + m_{fj} \quad (12)$$

M_{oj} - masa znacznika zawarta w oleju po j-tym cyklu [μg].

Jeżeli silnik pracuje z filtrami dokładnego oczyszczania, szczególnie ważne jest uwzględnienie ostatniego członu wzoru. Pomiar częstości zliczeń cząstek zużycia osadzonych na filtrach silnika S-359 jest kłopotliwy ze względu na wymiary filtrów i konieczność ich demontażu.

Ponieważ osłony filtrów są żeliwne, a promieniowanie Cr-51 niskoenergetyczne ($E_{\gamma} = 325 \text{ keV}$), konieczne było wyjmowanie pa-pierowych wkładów z osłon. Wprowadzało to pewne zakłócenia w przebiegu osadzania się cząstek zużycia. Każdorazowo po pomiarze filtrów wzrastał poziom aktywności oleju, aby ponownie obniżyć się w ciągu kolejnych cykli pracy silnika do następnego pomiaru filtrów. W przypadku stosowania wyłącznie filtrów siatkowych osadzanie się cząstek jest znikome.

Wyniki obliczeń M_{pj} i M'_{pj} przedstawione są graficznie na rys. 8. Intensywność zużycia pierścieni, wyznaczona na podstawie pomiarów radiometrycznych z uwzględnieniem strat oleju, wyniosła $0,49 \pm 0,15$ [mg/godz], natomiast po wniesieniu poprawki uwzględniającej bezpośrednio przechodzenie cząstek zużycia do spalin $0,80 \pm 0,18$ [mg/godz]. Wyniki te odnoszą się do konkretnych warunków pracy i stanu technicznego silnika. Jak widać, występują znaczne różnice, większe niż można byłoby oczekiwać na podstawie analizy udziału cząstek zużycia przechodzących bezpośrednio do spalin w globalnej wartości zużycia w danym cyklu badań. Aktywne cząstki chromu, które przeszły w ciągu 25 godzin pracy silnika bezpośrednio do spalin, stanowią około 12% globalnej wartości zużycia.

Wartości zużycia pierścieni chromowanych zestawione są w tabeli 3. Obliczenia przeprowadzone zostały na podstawie wyników pomiarów radiometrycznych znacznika według zależności (10) i (12) lub ich bardziej ogólnej formy (13) i (14). W bardziej ogólnej formie można je zapisać następująco:

$$M_p = M_o + M_{uo} + M_f \quad (13)$$

gdzie:

- M_p - globalna masa cząstek zużycia [μg],
- M_o - masa cząstek zużycia zawartych w oleju smarującym [μg],
- M_{uo} - straty masy cząstek zużycia proporcjonalne do ubytków oleju spowodowanych jego spalaniem i ewentualnymi wyciekami [μg],
- M_f - masa cząstek zużycia osadzonych na filtrze [μg],

lub

$$M'_p = M_o + M_{os} + M_{sp} + M_f \quad (14)$$

gdzie:

M'_p - całkowita masa cząstek zużycia [μg]

M_{os} - masa cząstek zużycia przechodząca do spalin z oleju smarującego (9) [μg],

M_{sp} - masa cząstek zużycia przechodząca do spalin bezpośrednio z pierścieni (11) [μg],

M_f - masa cząstek zużycia osadzonych na filtrze [μg].

Globalne wartości M_p i M'_p różnią się znacznie już po pierwszych godzinach pracy silnika. Masa cząstek zużycia, która podczas 25 godzin pracy przeszła do spalin, jest prawie równa masie zawartej w oleju smarującym. Ma to istotne znaczenie przy obliczaniu wartości intensywności zużycia.

Pominięcie bezpośredniego przechodzenia cząstek do spalin zaniża wynik o ponad 30 %.

W tabeli 4 i na rys.9 przedstawiono procentowo dystrybucję masy cząstek między olej, filtr i spaliny z uwzględnieniem bezpośredniego przechodzenia do spalin. Uwzględnienie procesu bezpośredniego przechodzenia cząstek zużycia do spalin ma istotne znaczenie dla prawidłowości wyników, uzyskiwanych przy badaniu górnych pierścieni tłokowych metodą izotopową.

4.4. Badanie zużycia pierścieni żeliwnych

Tłokowe pierścienie olejowe silnika S-359 wykonane są z żeliwa. Ich intensywność zużycia jest nieco większa niż pierścieni chromowanych, ponadto ze względu na różnice w strukturze materiału należy się spodziewać występowania cząstek o większych wymiarach niż przy ścieraniu warstwy chromu. Pierścienie tłokowe żeliwne, napromienione w reaktorze, zostały zamontowane w 2 i 3 rowkach tłoków, pracujących w sąsiednich tulejach (głowica I).

Warunki pracy silnika w kolejnych cyklach pomiarowych zachowano takie, jakie były stosowane przy badaniu pierścieni chromowanych, tzn. 2200 obr/min, obciążenie 80 kG, temp. oleju 85°C, temp. wody 80°C.

Silnik przepracował około 12 godzin przy pobieraniu próbek spalin z głowicy "nieaktywnej" i tyle samo przy pobieraniu próbek z głowicy,

gdzie pracowały pierścienie aktywne. Pomiary prowadzone były w taki sam sposób, jak przy badaniu pierścieni chromowanych. Mierzono częstość zliczeń próbek oleju, pyłu zebranego w osadniku cyklonu oraz osadu na filtrach.

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawione są w tabelach 5 i 6, a przedstawione graficznie na rys.10 i 11.

Zawartość w spalinach cząstek aktywnych, przechodzących do spalin bezpośrednio z pierścieni żeliwnych, wynosi około 36 %, a więc jest mniejsza niż w przypadku pierścieni chromowanych. Różnice intensywności zużycia są również mniejsze i praktycznie mieszczą się w granicach błędu. Uwzględnienie masy cząstek zużycia, przechodzących bezpośrednio do spalin, nie powoduje istotnych zmian intensywności zużycia - różnice mieszczą się w granicach błędu. Odpowiednie wartości wynoszą:

$$Z_{Fe} = 2,08 \pm 0,31 \text{ [mg/godz.]}$$

$$Z_{Fe} = 2,05 \pm 0,27 \text{ [mg/godz.]}$$

Brak wyraźnych różnic związany jest z pewnym oddaleniem pierścieni od komory spalania.

Na rys.12 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów globalnego zużycia pierścieni tłokowych chromowanych (I pierścień tłokowy) oraz żeliwnych (II pierścień tłokowy). Wykresy oznaczone literami a i c zostały sporządzone na podstawie pomiarów i obliczeń bez uwzględnienia masy cząstek zużycia, przechodzących do gazów spalinowych. Natomiast wykresy oznaczone literami b i d uwzględniają całkowity bilans zużycia.

Widoczne jest, że w przypadku badania zużycia pierścieni żeliwnych (umieszczonych w 2-gim rowku tłoka) udział cząstek zużycia przechodzących do spalin wynosi ok. 3 % w stosunku do globalnej wartości zużycia.

Potwierdzeniem tego są bardzo zbliżone przebiegi wykresów strat materiału znacznika, wyliczone na podstawie ubytków oleju i pomiarów częstości zliczeń pyłów zebranych w osadniku cyklonu. Podobnie jak w przypadku pierścieni chromowanych, największe zakłócenia i rozrzuty występują w związku z pomiarami radiometrycznymi cząstek osadzonych na filtrze. Właściwą krzywą zużycia otrzymuje się z analizy punktów, uwzględniających masę startych z aktywnych pierścieni cząstek osadzonych na filtrze. Duża częstotliwość pomiarów wynika

ze znacznego obniżania się efektywności wychwytu cyklonu przy przedłużaniu czasu trwania cyklu pomiarowego.

5. WNIOSKI

Przebieg badań i uzyskane rezultaty (rys.12) stanowią podstawę do stwierdzenia, że:

- a) Wyznaczanie bezwzględnych wartości zużycia takich części silnika, które w czasie pracy stykają się z gazami spalnymi, wymaga stosowania metody określania zawartości cząstek w spalinach, opartej o pomiary radiometryczne znacznika zbieranego w osadniku cyklonu.
- b) Efektywność wychwytu cząstek zużycia ze spalin winna być ściśle określana dla stosowanych warunków pracy silnika i danej konstrukcji cyklonu.
Należy spodziewać się, że zastosowanie baterii cyklonów połączonych szeregowo podniesie sprawność wychwytu i uniezależni jej wartość od warunków pracy silnika.
- c) Opracowany sposób znakowania oleju aktywnymi kompleksami metalo-organicznymi przy możliwości pobierania próbek z dużych objętości spalin może być wykorzystany również w oznaczaniu intensywności spalania oleju smarującego.
- d) Znaczna część cząstek zużycia górnych pierścieni tłokowych przechodzi bezpośrednio do spalin. Ma to istotny wpływ na wartości zużycia wyznaczone metodą izotopową. Tak więc badanie bezwzględnych wartości zużycia górnych pierścieni tłokowych wymaga prowadzenia również pomiarów promieniotwórczości próbek pobieranych ze spalin.
- e) Z pierścieni tłokowych żeliwnych, bardziej oddalonych od komory spalania, cząstki zużycia przechodzą głównie do oleju smarującego. Badanie zużycia pierścieni tłokowych w oparciu tylko o pomiary radiometryczne aktywnych cząstek zużycia zawartych w oleju można prowadzić wówczas, gdy udział cząstek, przechodzących bezpośrednio do spalin w czasie serii pomiarowej, jest minimalny, jak np. w przypadku pierścieni żeliwnych.

Określanie bezwzględnych wartości zużycia ma decydujące znaczenie dla prognozowania trwałości silników.

L i t e r a t u r a

1. G. Żukowska-Ćwik, A. Aścik, "Zastosowanie izotopów promieniotwórczych w badaniach eksploatacyjnych trwałości części mechanizmu różnicowego samochodu ciężarowego", Technika Motoryzacyjna, nr 1/236 s.4-9, 192.
2. Z. Banasik, G. Żukowska-Ćwik, A. Niewczas, J. Jędrzejczyk, "Porównawcze badania zużycia tulei cylindrowych silników S-539 metodą izotopową", Technika Motoryzacyjna, nr 10 (1973) s.19-24.
3. Z. Banasik, G. Żukowska-Ćwik, W. Grzyb, A. Niewczas, Zastosowanie izotopów w badaniach nad doбором oleju smarującego do silnika S-530. Technika Smarownicza, nr 6 (1973), s.161-167.
4. J. Jańcki, S. Gołąbek, Zużycie części i zespołów pojazdów samochodowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1971.
5. A. Minhejmer, "Badanie samochodów", Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1964, s.484.
6. A. Dąbrowski, M. Hebda, "Wpływ rodzaju oleju na wartość zużycia elementów tłokowych silników dwusuwowych. Technika Smarownicza Nr 1 (1972) s.12-16.
7. Z. Banasik, M. Radwan, K. Swigoń, E. Weźranowski, Izotopowe badania silnika okrętowego RD/68 w czasie jego eksploatacji, Raport IBJ nr 891/XX/1, 1968, s.15.
8. K. Kollan, W. D. Sitzler, "Speziele Verschleissmessungen Verbrennungsmotoren mit Hilfe radioaktive Isotope, Automobil Technische Zeitschrift, nr 6 (1967).
9. J. Fodor, "Investigation of Phenomena Affecting Engine Using Radioisotope Tracers", Symp. on Radioisotopes Application, Praha 1966.
10. A. Gerve, Radioisotopes in Mechanical Engineering, AED- Conf. - 71-100-55 Germany, May 1971.
11. R. Szepkę, "Radiometria stosowana", Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968, s.229.
12. R. Campbell, L. Granberg. "Study of Reactions of Metals with Sulphur and Phosphorus by Pulsed Temperature", Symp. Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, Kopenhaga 1950.
13. D. K. Don Hoffer, K. F. Duffschiemied, "Investigation of the Flange Lubrication of Revilway Trans", Symp. Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics, Praha 1966 , 84/8.

TABELA 1. Bilansowanie aktywności oleju smarującego znakowanego radioizotopem ^{65}Zn ,

Czas pracy silnika	N_p	N_o	N_{uo}	N_{sp}	$N_o + N_{uo}$	$N_o + N_{sp}$
h	imp/min · 10 ³					
0	111,29	12242,30			12242,3	12242,3
2	106,26	11538,10	158,04	363,68	11696,1	11901,8
4	107,77	11548,60	103,93	440,46	11857,5	11989,1
6	101,97	10680,30	461,97	552,66	11142,3	11202,9
8	102,44	10686,54	606,73	583,96	11293,3	11270,4
10	94,90	10249,95	1107,40	981,35	11357,3	11231,3
10,5	92,46	10008,60	1141,00	1146,55	11149,6	11155,2
				średnio	11536,2	11157,0

TABELA 2. Bilansowanie aktywności oleju znakowanego radioizotopem ^{59}Fe .

Czas pracy silnika	N_p	N_o	N_{uo}	N_{sp}	$N_o + N_{uo}$	$N_o + N_{sp}$
h	imp/min · 10 ³					
0	80,5	8052,3			8052,3	8052,3
3	78,2	7700,8	120,8	403,4	7821,6	8104,2
5	75,8	7390,8	198,9	527,5	7589,7	7918,3
5	76,2	7388,7	236,8	527,5	7625,5	7916,6
7	77,9	7519,9	274,9	592,6	7794,9	8122,5
8	71,1	7402,6	313,9	648,3	7716,5	8050,8
9	78,1	7457,9	352,5	672,1	7810,3	8130,0
				średnio	7773,0	8042,1

TABELA 3. Bilansowanie masy cząstek zużycia pierścieni chromowanych.

Czas pracy silnika	M_o	M_{uo}	M_f	M_p	M_s	M_{sp}	M'_p
h	mg						
0	0,6608			0,6608			0,6608
4	1,8839	0,0282	0,1837	1,8872	0,2462	0,0933	2,2889
9	7,3963	0,6737	0,9528	9,0227	0,7217	0,2150	9,0708
14	7,5733	1,6559	1,8014	11,0310	2,2476	0,5595	11,6253
20	8,5223	2,3901	2,8574	13,7698	5,4155	1,7109	15,8444
25	8,5315	3,1439	2,8550	14,5305	7,5774	2,2571	18,9663

TABELA 4. Dystrybucja cząstek zużycia pierścieni chromowanych.

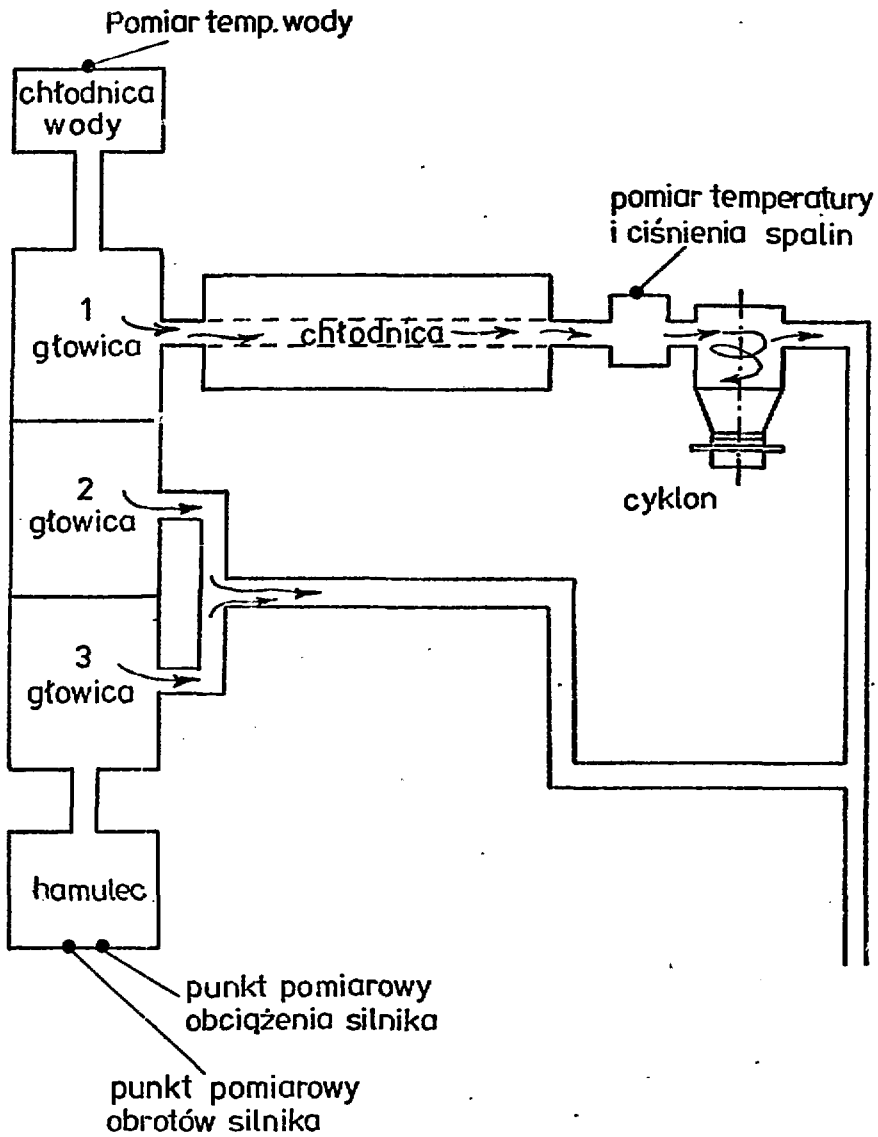
Czas pracy silnika	M_o/M_p	M_f/M_p	M_s/M_p	M_{sp}/M_p
h	%			
0	100			
4	81,2	8,0	10,8	4,0
9	31,2	10,5	7,9	2,4
14	65,1	15,5	19,3	5,7
20	49,0	18,0	32,8	9,5
25	45,0	15,0	39,9	11,9

TABLICA 5. Bilansowanie masy cząstek zużycia pierścieni żeliwnych.

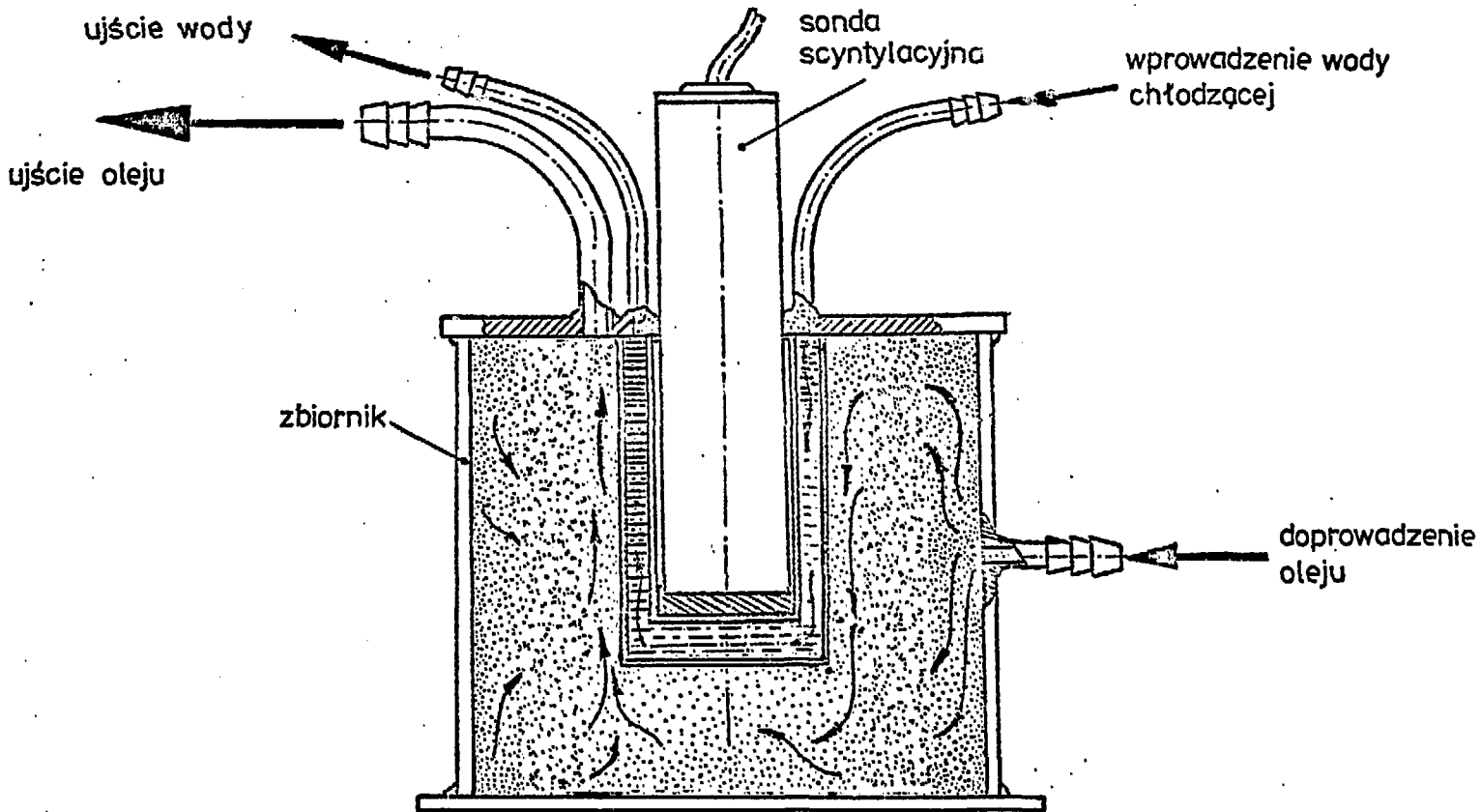
Czas pracy silnika	M_o	M_{uo}	M_f	M_p	M_s	M_{sp}	M'_p
h	mg						
0	33,859			33,859			33,859
5	50,879	3,139	23,860	77,879	3,310	0,541	78,050
11	60,648	5,237	19,501	85,586	9,383	1,093	79,632
15	56,526	13,892	15,953	85,472	11,962	1,396	83,542
25	52,057	23,985	19,469	95,520	24,199	2,663	95,734

TABLICA 6. Dystrybucja cząstek zużycia pierścieni żeliwnych.

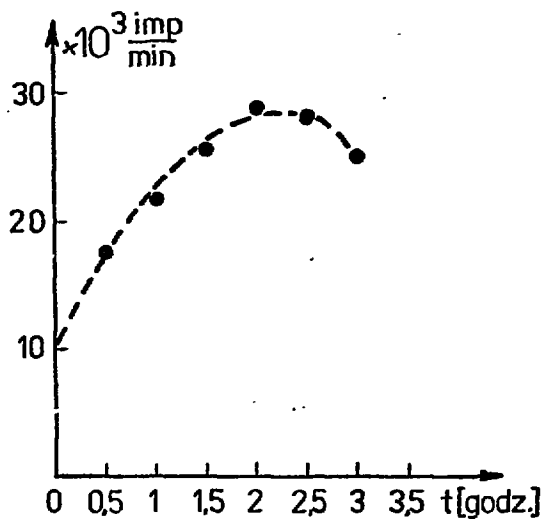
Czas pracy silnika	M_o/M_p	M_f/M_p	M_s/M_p	M_{sp}/M_p
h	%			
0	100			
5	64,2	30,5	4,2	0,7
11	80,8	24,6	11,7	1,3
15	87,9	19,2	14,3	1,7
25	54,8	20,4	25,4	2,8



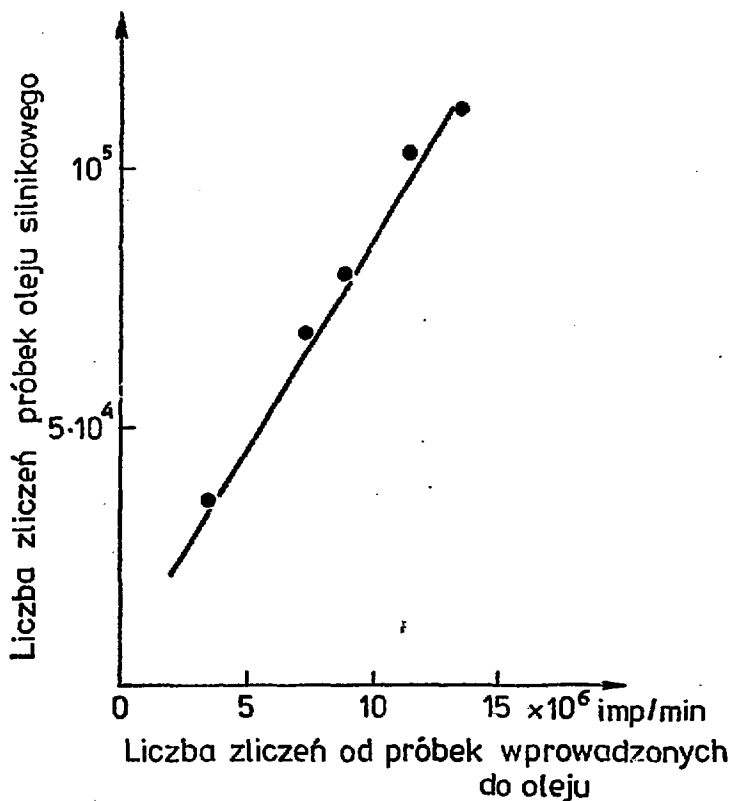
RYS.1. Schemat układu stanowiska pomiarów promieniowania spalin.



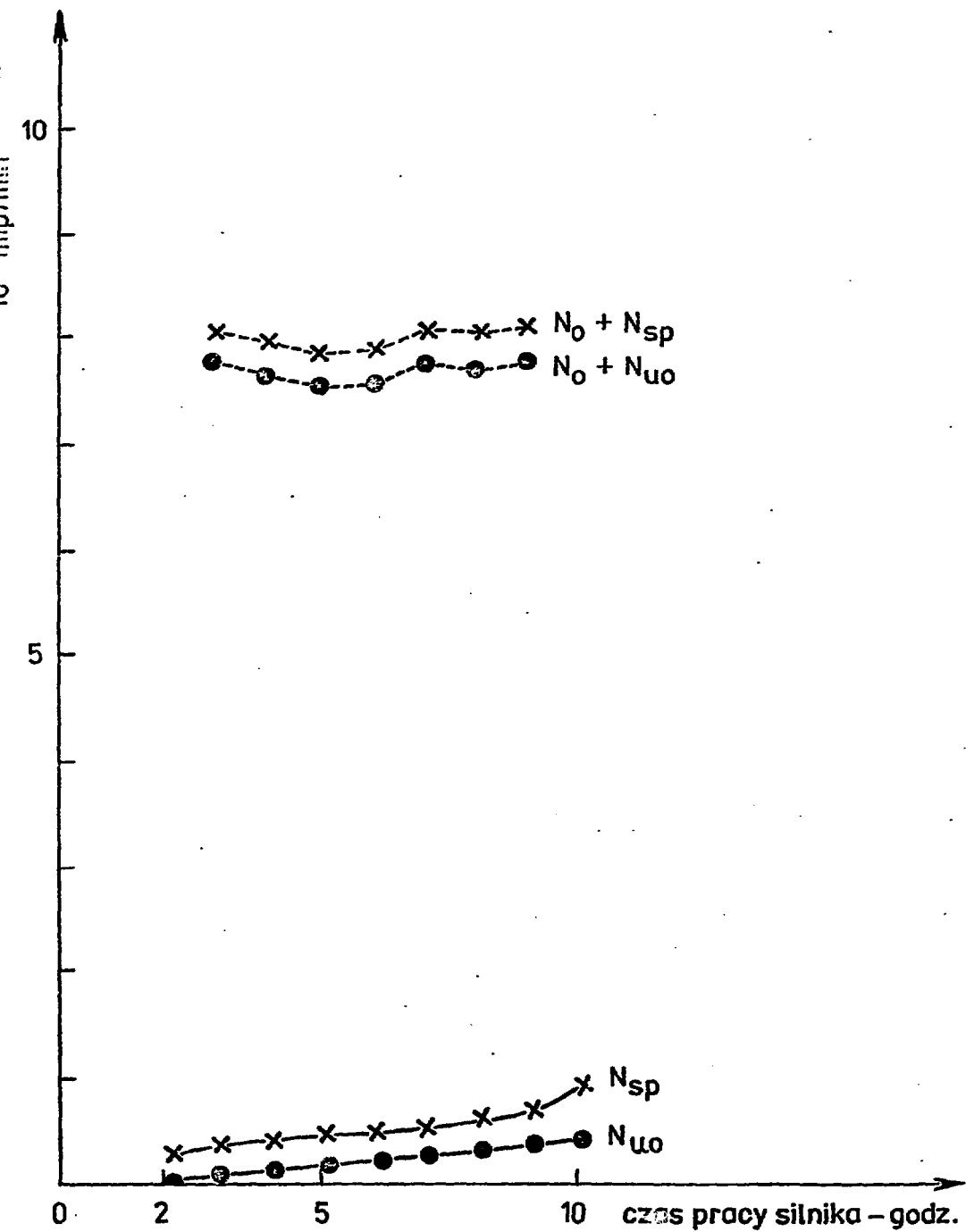
RYS.2. Naczynie do pomiaru aktywności w przepływie.



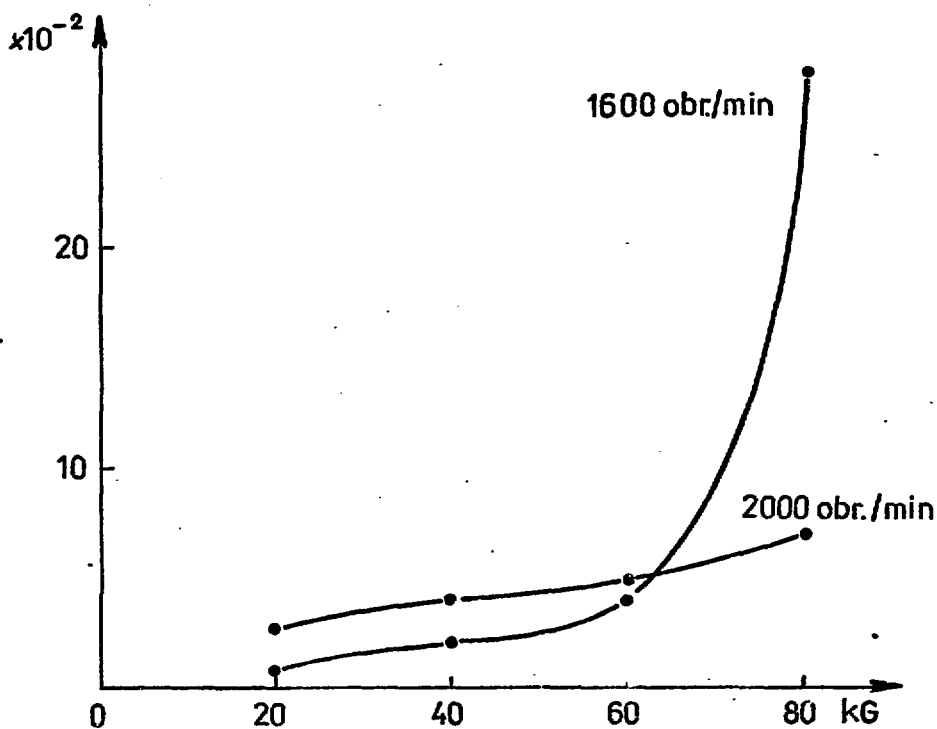
RYS.3. Zależność prędkości zliczeń z cyklonu od czasu pracy silnika.



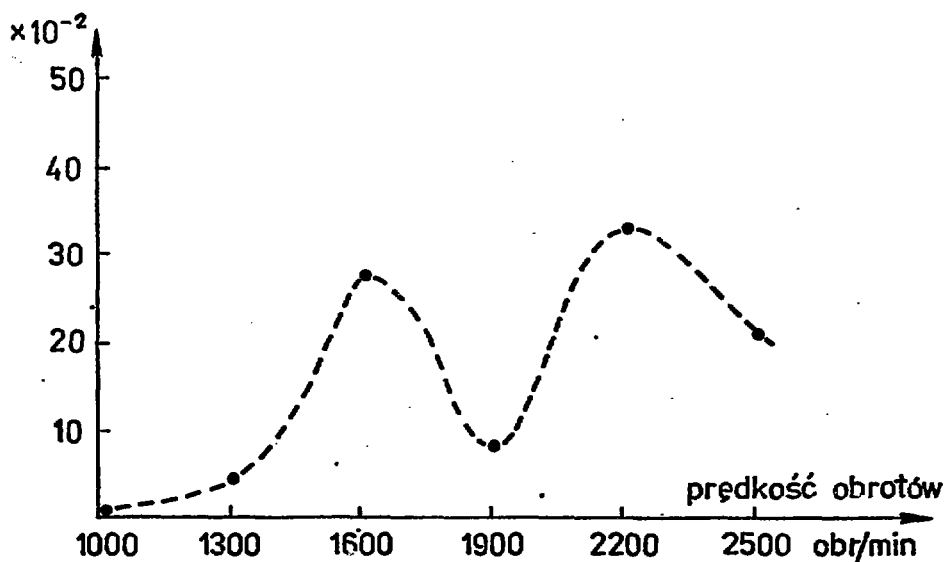
RYS.4. Wykres jednorodności wymieszania znacznika radioaktywnego w oleju silnikowym.



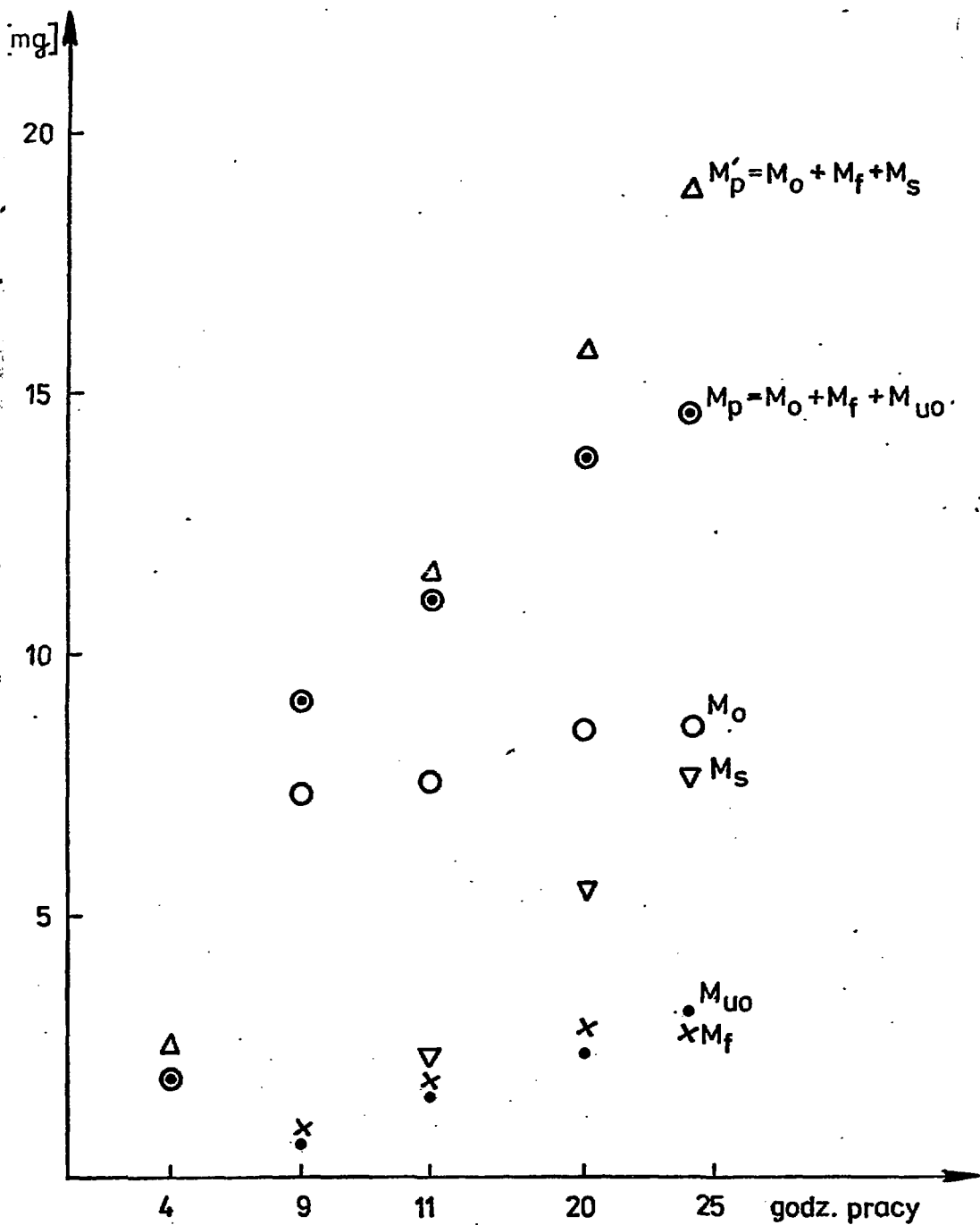
RYS.5. Bilans aktywności oleju silnikowego znakowanego kompleksem ^{59}Fe .



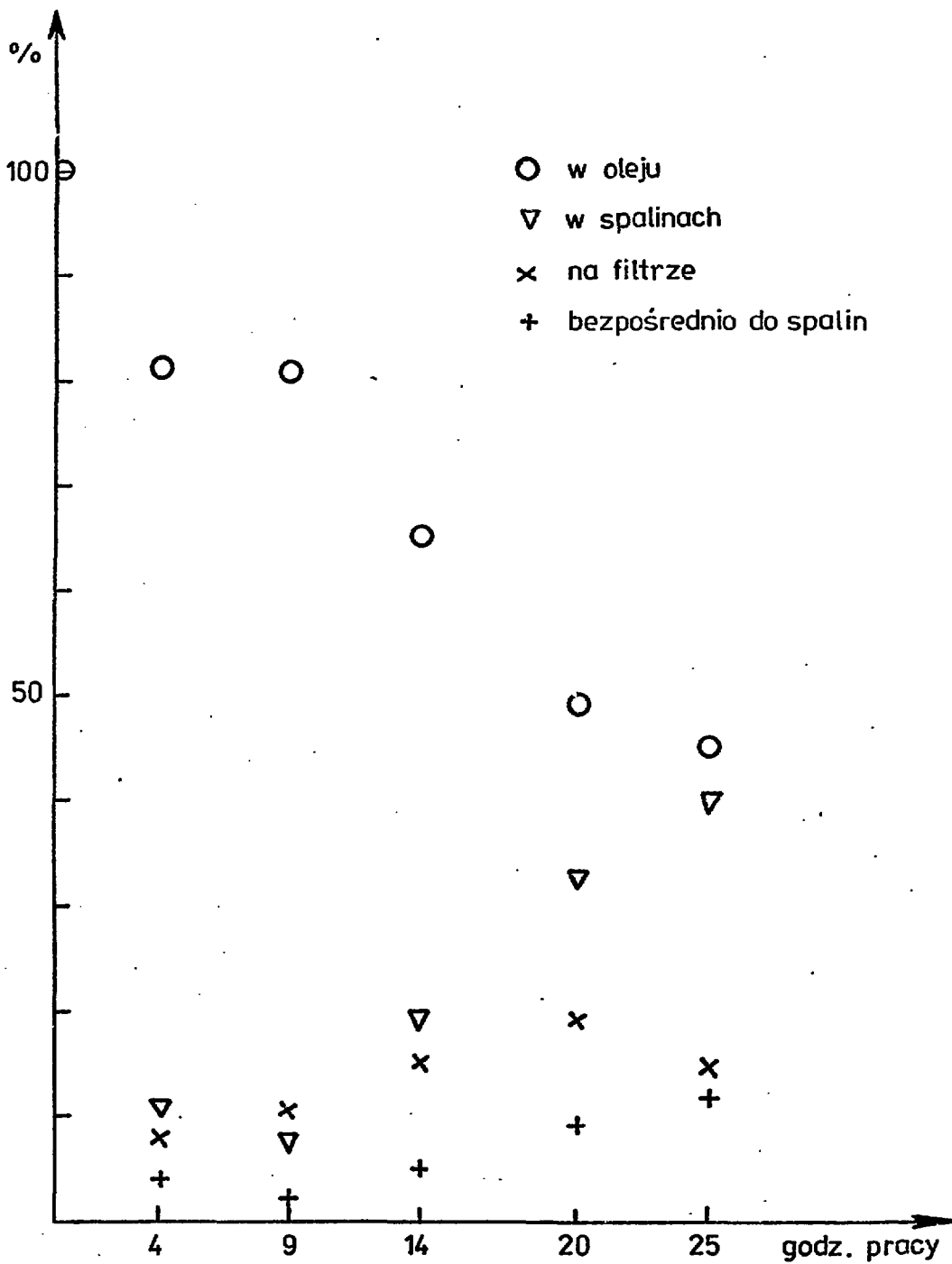
RYS.6. Względna wydajność wychwytu cyklonu w funkcji obciążenia.



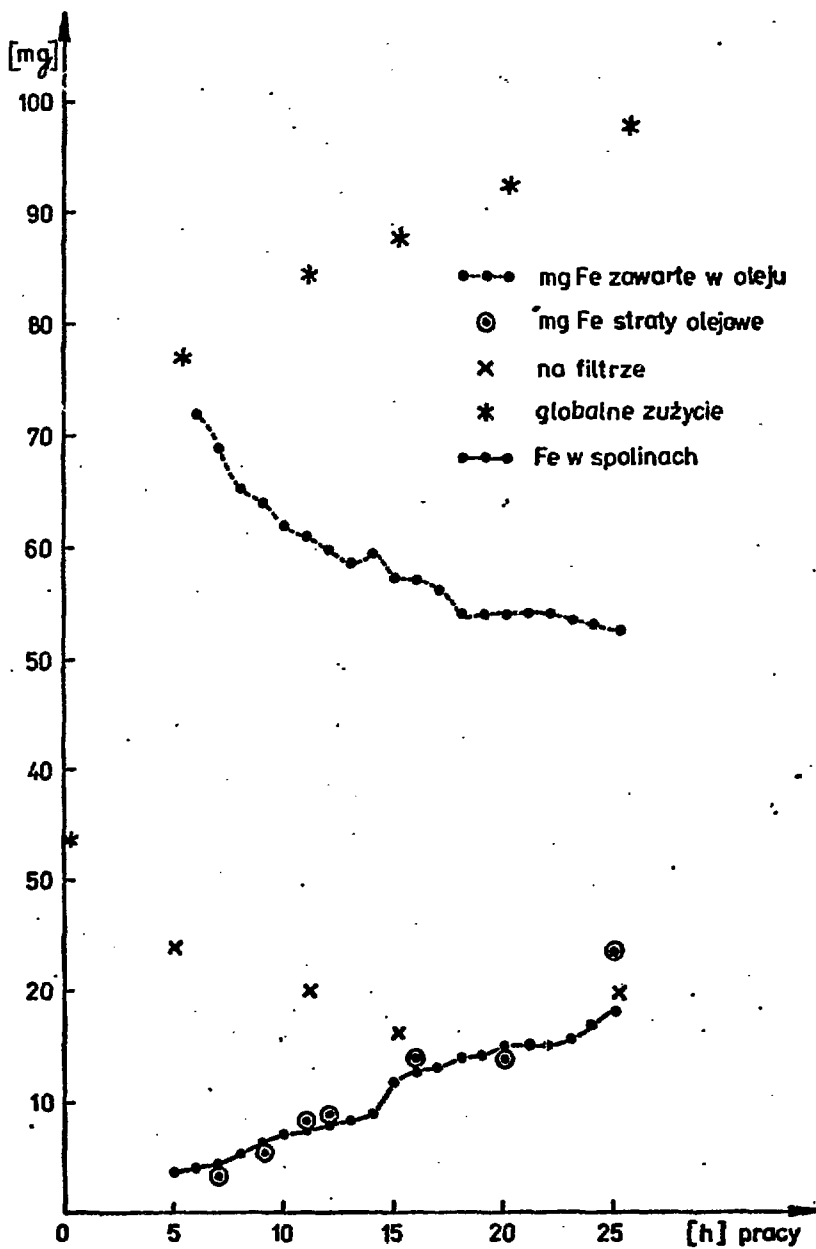
RYS.7. Względna wydajność cyklonu w funkcji prędkości obrotowej wału silnika P=80 kG.



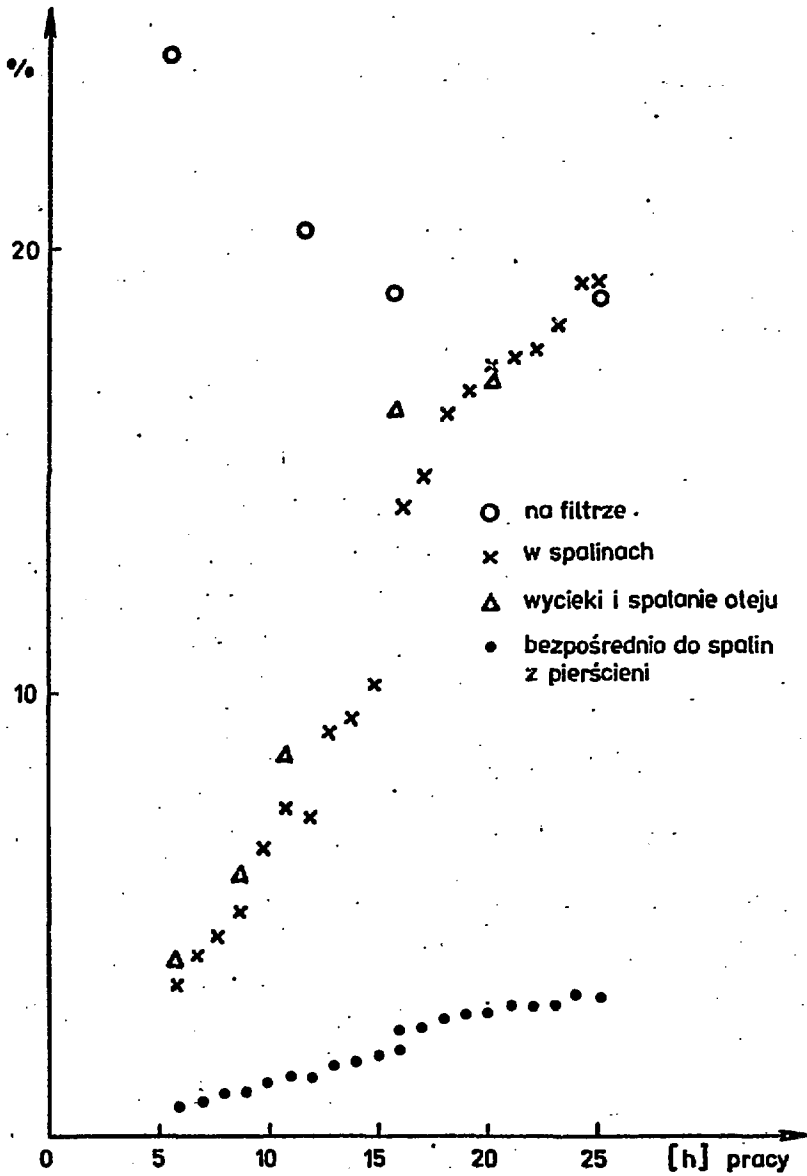
RYS.8. Bilansowanie masy cząstek zużycia pierścieni chromowanych.



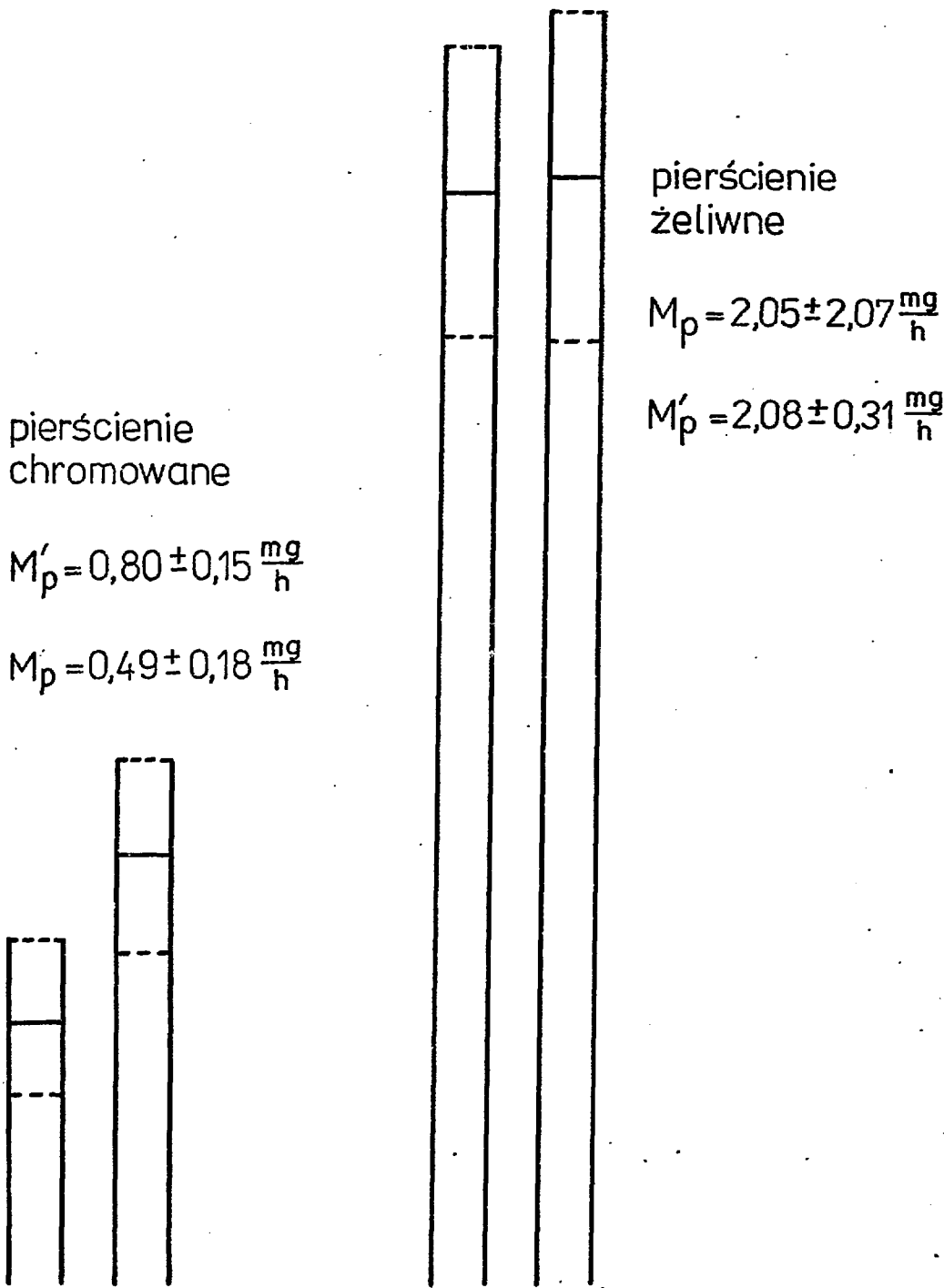
RYS.9. Dystrybucja cząstek zużycia pierścieni tłokowych chromowanych.



RYS.10. Bilans zużycia pierścieni żeliwnych.



RYS.11. Procentowy udział strat Fe z pierścieni olejowych w ogólnej wartości zużycia.



RYS.12. Intensywność zużycia pierścieni tłokowych.

