

METODA UWIDOCZNIANIA SMUG W ZASTOSOWANIU DO ANALIZY PROCESÓW SPALANIA W SILNIKU WYSOKOPRĘŻNYM

Zdzisława Rotter, Zbigniew Oszczak

Zakład Maszynoznawstwa Ogólnego Instytutu Mechanizacji Rolnictwa AR
w Lublinie

WPROWADZENIE

Badania przepływu czynnika w silnikach spalinowych od dawna fascynowały naukowców. W latach sześćdziesiątych w Katedrze Silników Spalinowych Politechniki Szczecińskiej pod kierownictwem prof. Dziewanowskiego zostały przeprowadzone badania, dotyczące wymiany czynnika w silnikach spalinowych. W szczególności bardzo dokładnie przebadano proces wymiany czynnika w silniku P-35, pierwszej oryginalnej polskiej konstrukcji dużego silnika okrętowego. Badania te pozwoliły na zaproponowanie zmian w konstrukcji szczelin dolotowych, mających bardzo duży wpływ na pracę i eksploatację tego silnika.

W badaniach, między innymi, zastosowano wizualizację procesu przepływu metodą H. Dziewanowskiego, polegającą na dodawaniu rozżarzonych cząstek węgla do przepływających strug powietrza. W celu umożliwienia filmowania tego zjawiska musiał być wykonany specjalny model silnika z przezroczystym cylindrem. Metoda ta jednak, mimo że dała dobre wyniki, nie mogła wyjaśnić wszystkich zjawisk zachodzących w czasie przepływu czynnika w komorze spalania. Znacznie więcej informacji dotyczących czynników wpływających na proces spalania (a mianowicie zawirowania, odparowania, wymieszania i innych uzależnionych od konstrukcji samego silnika) przyniosło filmowanie tego procesu metodą smugową, zastosowaną w 1864 r. przez A. Toeplera do obserwacji wzrokowej i zarejestrowaną na taśmie filmowej przy wykorzystaniu techniki zdjęć szybkich oraz układu optycznego przez Millera [5].

Najnowsze badania zostały wykonane przez Ruston and Hornsby Limited na silniku wysokoprężnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa, zaś kompletny układ optyczny został zademonstrowany nam na Targach Poznańskich w 1975 r.

Nim jednak przejdziemy do opisu prac wykonanych przez autorów, należałoby przypomnieć samą metodę smugową. W metodzie tej wykorzystuje się załamanie, czy też inaczej mówiąc odchylenie promieni świetlnych, przechodzących przez ośrodki niejednorodne. Najprostszym przykładem uwidaczniania smug jest tzw. bezpośrednia metoda cieniowa (rys. 6). W metodzie tej prześwietlamy obiekt możliwie punktowym źródłem światła Z . Wówczas na ekranie otrzymujemy smugi dzięki nierównomiernemu rozkładowi natężenia światła. Obrazy otrzymane za pomocą metody cieniowej są zwykle nieostre. Spowodowane to jest geometrią układu oraz tym, że przedmiot nie jest optycznie odwzorowany na planie. Toepler, zapożyczając pomysł od Foucaulta, opracował metodę smug z odwzorowaniem optycznym. W zaprojektowanym przez niego układzie (rys. 2) źródło światła umieszczone jest za przesłoną kołową P , obraz przedmiotu jest w dalszym ciągu wytwarzany na matówce M za pomocą obiektywu O . Jeżeli przedmiot nie posiada żadnych niejednorodności, wówczas cały strumień pochodzący z przesłony P przedostaje się przez otwór kołowy przesłony P' . Obraz powstały na matówce posiada wówczas jednakowy rozkład jasności. Jeżeli jednak w przedmiocie zachodzi odchylenie światła, wówczas zostaje on zatrzymany przez przesłonę P i odpowiednie miejsca obrazu stają się ciemniejsze. Całkowicie ciemny obraz uzyskujemy, gdy wielkość odchylenia występującego w przedmiocie jest $\varepsilon > \frac{P}{a}$. Przez dobór przesłon można zmieniać wielkości kąta granicznego.

Następne prace Teoplera poszły w kierunku zmiany przesłon P i P' z kołowych na prostokątne. Za pomocą przesłony P była więc wycinana wiązka światła o stałej szerokości, a tym samym pole widzenia posiadało stałe natężenie światła, natomiast każdy punkt przedmiotu, dający odchylenie w kierunku prostopadłym do szczeliny, powodował zmianę natężenia. Natężenie to było mniejsze, gdy światło było odchylane w kierunku krawędzi szczeliny i na odwrót. Obraz powstały w ten sposób zawiera dużą ilość stopni natężenia i pozwala na przeprowadzenie pomiarów ilościowych.

Najbardziej znany z układów technicznych jest układ, w którym zastosowano zwierciadło wklęsłe (rys. 2). Przesłony P i P' znajdują się tu w odległości równej promieniowi krzywizny zwierciadła, jednak nie leżą na jego osi optycznej. Przedmiot musi znajdować się w wiązce światła w takim miejscu, gdzie promienie nie przechodzą dwukrotnie. W wielu przypadkach stosowana jest metoda koincydencyjna, polegająca na umieszczeniu szczelin P i P' bezpośrednio obok siebie w środku krzywizny

zwierciadła wklęsłego. Tę właśnie metodę zastosowano do badania silnika wyprodukowanego przez Ruston and Hornsby Limited. Badania przeprowadzono na hamowni.

STANOWISKO BADAWCZE ORAZ JEGO WYPOSAŻENIE

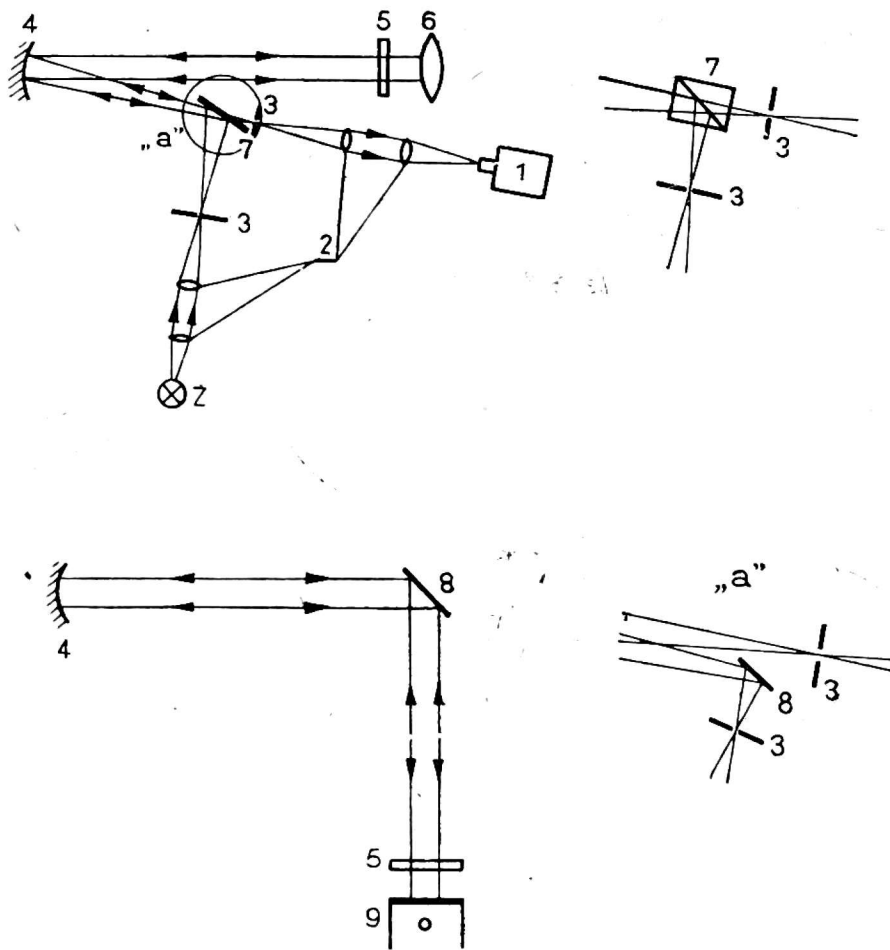
Bezpośrednio do silnika przytwierdzono specjalną płytę do umocowania układu optycznego oraz kamery do zdjęć szybkich. Układ składał się z lampy rtęciowej typu No AEJ ME/DP28/25, układu soczewek ogniskujących, dwóch płaskich oraz jednego wklęsłego zwierciadła o średnicy 100 mm i długości ogniskowej 1120 mm oraz dwóch szczelin prostokątnych o regulowanej szerokości (rys. 1). Dodatkowo stanowisko wyposażono w układ optyczny do oznaczania na taśmie filmowej kątów obrotu wału korbowego. Do filmowania użyto kamerę do zdjęć szybkich typu Fastax Hitachi 16HM. Kamerę wyposażono w dwa różne obiektywy:

— jeden do fotografowania procesów w komorze spalania w warunkach rzeczywistych;

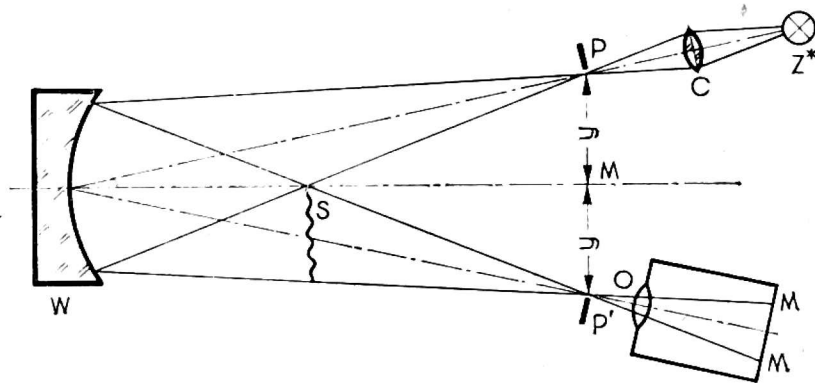
— drugi dla warunków wywołanych wymuszonym, pulsacyjnym przepływem nagrzanego powietrza przy zatrzymanym silniku.

Silnik oraz kamera były sterowane za pomocą specjalnego programatora [5]. Na wałku rozrządu silnika został zamontowany stycznik kontaktowy do włączenia kamery. Schemat układu optycznego pokazano na rysunku 1.

Wiązkę światła z lampy rtęciowej Z przepuszczono przez soczewki ogniskujące oraz szczelinę prostokątną o regulowanej szerokości. Zapewniło to wycięcie wiązki światła o stałej szerokości i natężeniu. Następnie wiązkę przepuszczono przez podwójny pryzmat lub płaskie zwierciadło wklęsłe. Dalej wiązka została skierowana na płaskie zwierciadło, na denko tłoka przez przezroczyste okno, wykonane specjalnie do tego celu w głowicy. Odbita wiązka wraca z powrotem na zwierciadło wklęsłe i zostaje skierowana do obiektywu kamery poprzez regulowaną szczelinę prostokątną oraz układ soczewek ogniskujących. Metoda ta zapewnia dużą czułość układu, oraz nie jest podatna na wpływ odległości obiektu od zwierciadła wklęsłego. Silnik do przeprowadzenia badań wyposażono w tłok oraz zawór umożliwiający dokonywanie wymuszonego przepływu podgrzanego powietrza przez komorę. W głowicy silnika wykonano otwór nad tłokiem o średnicy 75 mm, a w późniejszych badaniach zwiększono średnicę do 200 mm. Otwór został zamknięty płytką kwarcową oraz uszczelniony specjalną uszczelką. Użycie podatnej uszczelki wyeliminowało pęknięcie płytki kwarcowej, zarówno przy montażu jak i przy przeprowadzeniu prób. Wykonanie okna w głowicy wprowadziło niewielkie zmiany kształtu komory spalania (rys. 4). Na rysunku 3 pokazano tłok



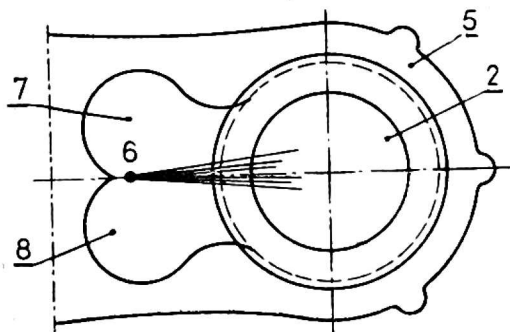
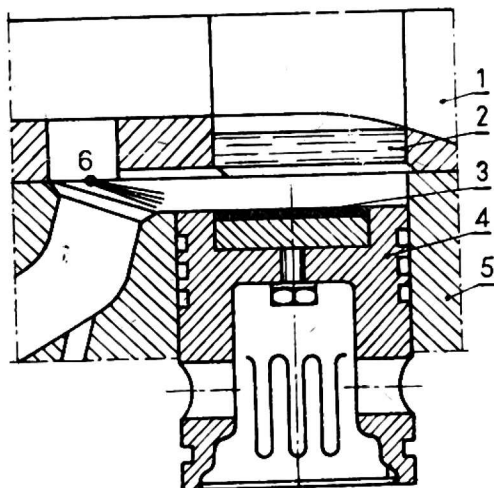
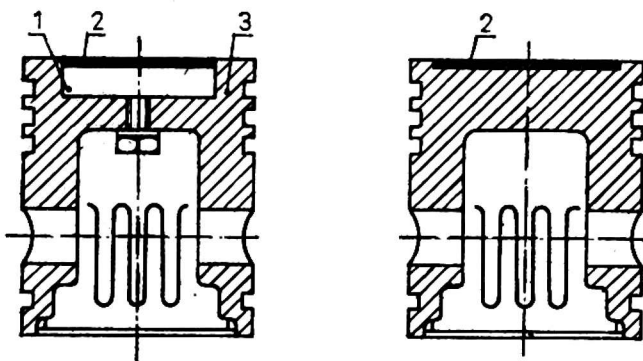
Rys. 1. Układ optyczny: 1 — kamera do zdjęć szybkich, 2 — układ soczewek, 3 — szczeliny prostokątne, 4 — zwierciadło wklęsłe, 5 — płytka kwarcowa, 6 — zwierciadło płaskie (na denku tłoka), 7 — pryzmat, 8 — zwierciadło płaskie, 9 — tłok, Z — źródło światła



Rys. 2. Metoda smug z zastosowaniem zwierciadła wklęsłego: W — zwierciadło wklęsłe, Z* — źródło światła, C — soczewka, P — szczelina, S — obiekt, O — obiektyw, M — ekran

silnika, przygotowany do przeprowadzenia badań. Widoczne na denku zwierciadło płaskie o średnicy równej połowie średnicy tłoka uzyskano przez nałożenie warstwy chromu o grubości 0,120 mm bezpośrednio na materiał tłoka lub na wkładkę. Zastosowanie wkładki w znacznym stop-

Rys. 3. Umieszczenie zwierciadła na denku tłoka: 1 — wkładka, 2 — powłoka chromu, 3 — tłok



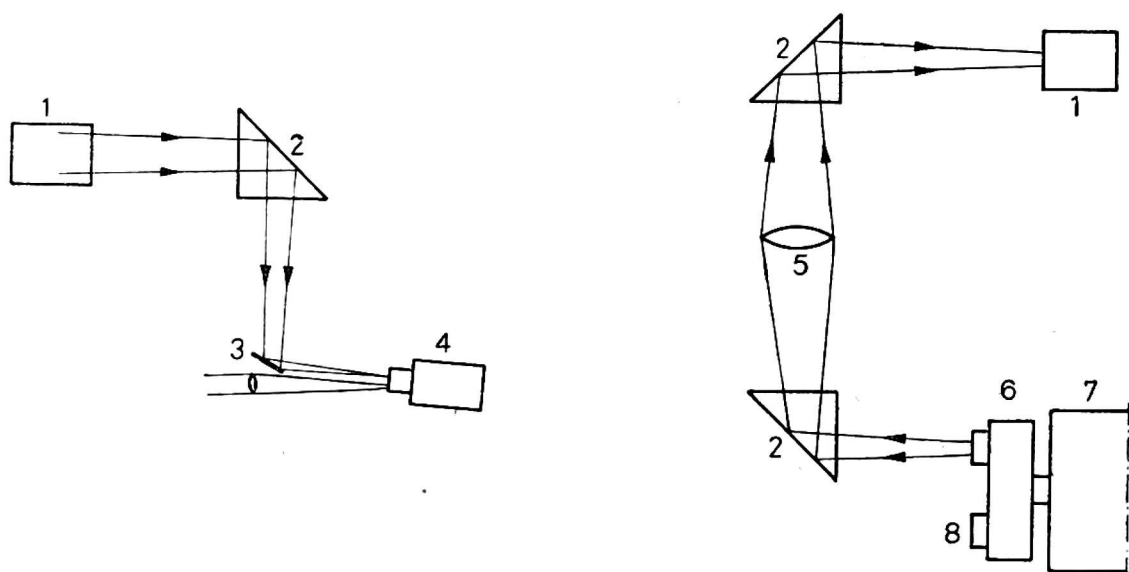
Rys. 4. Umieszczenie płytki kwarcowej w głowicy: 1 — głowica, 2 — płytki kwarcowa, 3 — zwierciadło, 4 — tłok, 5 — cylinder, 6 — wtryskiwacz, 7 — zawór ssący, 8 — zawór wydechowy

niu wyeliminowało zniekształcenie zwierciadła, spowodowane nagrzewaniem tłoka. Płaskość zwierciadła uzyskano przez dokładne polerowanie. Należy podkreślić fakt, że płaszczyzna zwierciadła musi być odporna na efekty ściernoerozyjne podczas cyklu spalania i nie może zniekształcać obrazu. Po każdym cyklu badań powierzchnia zwierciadła powinna być dokładnie oczyszczona. Podczas przeprowadzonych wstępnie badań luz między tłokiem i tuleją wynosił 0,15 mm. Luz ten okazał się zbyt duży, gdyż nie pozwalał na precyzyjne prowadzenie tłoka, a tym samym powodował przechyłanie się zwierciadła na denku. Problem ten zanikł przy zmniejszeniu luzu do wartości 0,063 mm. Biorąc pod fakt, że filmowanie wykonywano dla krótkich cykli pracy luz ten był wystarczający dla każdego testowanego silnika, bez występowania tendencji zacierania się tłoka. W czasie badań zaobserwowano nadmierne zanieczyszczenie zwierciadła na denku tłoka olejem silnikowym. Dokładne dopasowanie pierś-

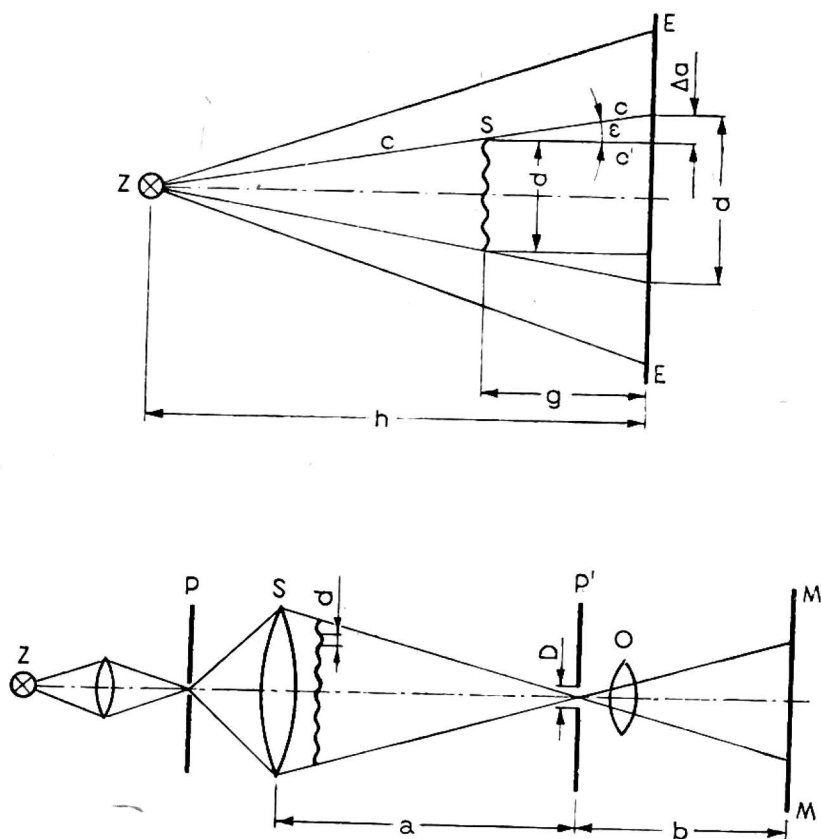
cieni zgarniających w dolnej części tłoka wyeliminowało i ten problem. W rezultacie olej silnikowy nie ukazywał się na zwierciadle w ciągu dwóch do trzech minut pracy silnika.

System optyczny został zamontowany na płycie przytwierdzonej do silnika przy zastosowaniu elastycznych gumowych poduszek. W początkowym okresie badań kamerę filmową umieszczono na osobnej kolumnie, lecz później przymocowano ją do płyty, na której znajdował się system optyczny. Spowodowało to wyeliminowanie wpływu wibracji silnika na jakość otrzymywanych zdjęć.

Najlepsze rozwiązanie układu podświetlenia lampą rtęciową uzyskano dla układu z zastosowaniem dodatkowego płaskiego zwierciadła, w którym promienie ze źródła światła nie leżały na osi łączącej zwierciadło wklęsłe z obiektywem kamery (rys. 1a). Skierowanie w ten sposób oświetlenia dało niewielkie straty, co było bardzo istotne w przypadku zastosowania dużej prędkości filmowania. Ustawienie płaskiego zwierciadła kierującego promienie ze źródła światła na zwierciadło wklęsłe (szerokości szczelin wybierających wiązkę oświetlającą oraz wiązkę kierowaną na obiektyw kamery) dobierano doświadczalnie dla rzeczywistych warunków badań. Szerokość szczeliny prostokątnej przepuszczającej wiązkę oświetlającą dla warunków opisanych w tej pracy wynosiła 1 mm, natomiast szczeliny odcinającej wiązkę kierowaną do obiektywu — 2,04 mm. Początkowa prędkość filmowania 8000 zdjęć na sekundę okazała się zbyt mała. Dobre rezultaty otrzymano dla prędkości 16 000 zdjęć na s przy prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1200 obr. na minutę. Wykonano też próby z zastosowaniem filtrów barwnych, lecz interpretacja ich okazała się bardzo trudna. Na rysunku 5 pokazano system powiązania op-



Rys. 5. Układ optyczny oznaczania kąta obrotu wału korbowego: 1 — układ soczewek (regulacja ostrości obrazu), 2 — pryzmat, 3 — zwierciadło płaskie, 4 — kamera, 5 — soczewka, 6 — koło zamachowe, 7 — silnik, 8 — znacznik kąta o.w.k.



Rys. 6. Bezpośrednia metoda cieniowa

tycznego wykonywanych zdjęć ze znacznikiem kąta obrotu wału korbowego. Napotkano tu duże trudności przy ustawianiu ostrości kamery mającej równocześnie filmować obraz zmian w cylindrze i rejestrować znaczniki położenia wału. Rozwiązanie poszło oczywiście w kierunku filmowania zmian w cylindrze, doświadczalnie zaś dobrano układ przekazujący obraz oznaczania kąta wału korbowego.

LITERATURA

1. E. Angerer, H. Eert: Technika eksperymentu fizycznego.
2. Hempson J. G. G.: An Automatic Control System for High Speed Cine Camera. Paper M-3 5th International Congress on High Speed. Photography 1960.
3. Journal of Photographic Science Vol. 10, 1962.
4. Lyn W. T., and E. Valdmanis: The Application of High Speed Schlieren Photography to Diesel Combustion Research.
5. Miller C. D.: Photographic Study of events in a 14-inch 2 cycle Gas Engine Cylinder. Trans. ASME Vol. 71 No 1 January 1954.
6. North R. J. and Cash R. F.: Colour Schlieren photography in High Wind Tunnels. NPL/AERO/383 June 1959.

Здзислава Роттер, Збигнев Ощак

МЕТОД НАГЛЯДНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛОС
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ СТОРАНИЯ
В ДИЗЕЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Резюме

В статье описываются испытания проведенные фирмой Рустон Хорнсби Лимитед на дизельном двигателе с непосредственным впрыскиванием топлива. В испытаниях использовывали полосовой метод, позволяющий наглядно представить процессы связанные с обменом рабочего агента в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Регистрация процессов провадилась с помощью специальной оптической системы, камеры для скорых съемок и системы обозначающей угол вращения кривошипного вала. Фильмование процессов происходящих в камере сгорания оказалось возможным благодаря выполнению в головке дополнительного отверстия диаметром 75 мм, закрываемого кварцевой плиткой.

Полная оптическая система для проведения испытаний демонстрировалась Фирмой Рустон Хорнсби Лимитед на Познаньской международной ярмарке.

Zdzisława Rotter, Zbigniew Oszczak

THE METHOD OF VISUALIZING STREAKS TO BE APPLIED
IN THE ANALYSIS OF COMBUSTION PROCESSES
IN THE DIESEL ENGINE

Summary

Tests carried out by the Ruston Hornsby Ltd. on the Diesel engine with a direct fuel injection are described in the paper. The streak method enabling to visualize the processes connected with the working agent exchange in the combustion motor cylinder was made use of. Recording of the processes was carried out by means of a special optical system, the film camera for quick shots and the system marking the crankshaft rotation angle. Filming of the processes occurring in the combustion chamber was possible owing to execution of an additional hole in the head of 75 mm in dia, closed by a quartz plate.

The full optical system for carrying out tests was demonstrated by the Ruston and Hornsby Ltd. at the Poznań International Fair in 1975.