

Kornel Dybich  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

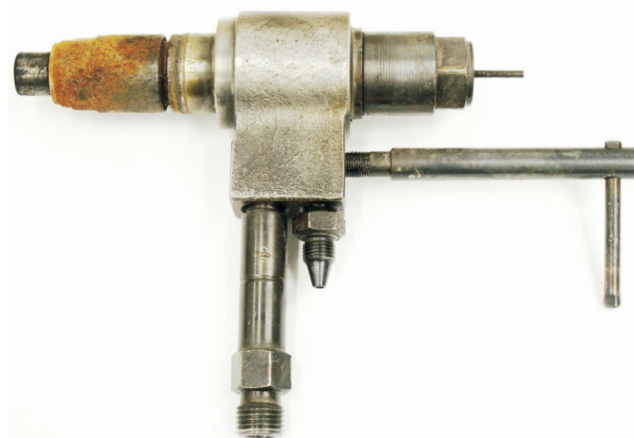
## Problemy eksploatacyjne silników badawczych CFR Waukesha

### Wprowadzenie

Przystąpienie Laboratorium Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG do monitoringu paliw, polegającego na oznaczaniu liczb oktanowych (motorowej – LOM oraz badawczej – LOB) i liczby cetanowej – LC, spowodowało szereg komplikacji związanych z utrzymaniem w wymaganym stanie technicznym silników badawczych służących do oznaczania tych liczb – zwłaszcza w przypadkach paliw niewłaściwej jakości.

Wszystkie będące na wyposażeniu INiG silniki badawcze służące do oznaczania liczb oktanowych i liczby cetanowej, wyprodukowane przez firmę Dresser Waukesha (USA), spełniają wymagania najnowszych norm paliwowych, jednak są to konstrukcje z lat 60., gdzie powszechnie stosowanym układem zasilającym silniki o zapłonie iskrowym był gaźnik, a dodatkiem podwyższającym liczbę oktanową benzyny – czteroetylek ołowiu. Należy również nadmienić, że silnik do oznaczania liczby cetanowej jest wyposażony w rzędową, jednosekcyjną pompę paliwa, prostą komorę spalania i wtryskiwacz z czopikowym rozpylaczem (fotografia 1). Te rozwiązanie konstrukcyjne

nie zostały zmienione do dnia dzisiejszego, a silniki CFR Waukesha są jedynymi silnikami badawczymi przyjętymi oraz zatwierdzonymi przez producentów paliw, służącymi do oznaczania liczb oktanowych i liczby cetanowej paliw do tłokowych silników spalinowych.



Fot. 1. Rozpylacz paliwa silnika badawczego CFR Waukesha, służącego do oznaczania liczby cetanowej (fot. INiG Kraków)

### Część badawcza

Podczas prowadzenia badań – zwłaszcza oznaczania liczb cetanowych olejów napędowych – zauważono pewne trudności występujące w odczycie parametrów pracy silnika badawczego LC, związane z brakiem stabilizacji odczytu kąta opóźnienia samozapłonu paliwa wtryskiwanego do komory spalania silnika.

Zdecydowano zatem poddać kontroli wtryskiwacz paliwa silnika badawczego, jako element w dużej mierze odpowiedzialny za przebieg prawidłowego spalania.

Kontrola wtryskiwacza paliwa wykazała znaczne odstępstwa (fotografia 2) od wzorcowego rozkładu rozpylenia strugi, wymaganego przez normę ASTM D 613 (rysunek 1) i producenta silnika. Zaobserwowano brak środka strugi oraz nierównomierne obwodowe rozpylanie paliwa.

Sprawdzono ciśnienie otwarcia iglicy rozpylacza według ASTM D-613 i stwierdzono brak szczelności (tworzenie kropli paliwa przy otworze czopka iglicy rozpylacza), przy jednoczesnym spadku ciśnienia. Oględziny makro-



Fot. 2. Rozkład rozpylenia strugi paliwa przez wtryskiwacz silnika CFR Waukesha, po oznaczeniu olejów napędowych wątpliwego pochodzenia (fot. INiG Kraków)



Rys. 1. Wzorcowy rozkład rozpylenia strugi paliwa przez wtryskiwacz, według ASTM D-613 (rys. norma ASTM D-613)

i mikroskopowe wykazały ubytki materiału (wżery) na powierzchni czołowej rozpylacza oraz iglicy (fotografia 3).

Próbki monitorowanych paliw poddano analizie chemicznej i stwierdzono, że olej napędowy był silnie zakwa-



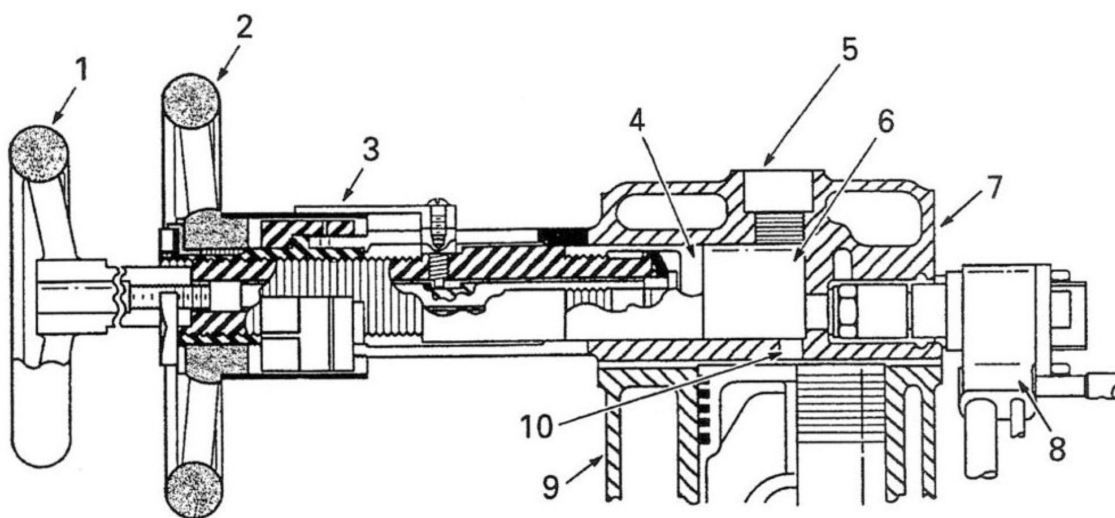
Fot. 3. Ubytki materiału na powierzchni czołowej rozpylacza paliwa, silnika badawczego CFR Waukesha (fot. INiG Kraków)

szony, a niektóre próbki paliw zawierały mikroskopijne cząstki wapna i gipsu.

Jak ogólnie wiadomo, przy wprowadzaniu do obrotu nielegalnie odbarwianego lekkiego oleju opałowego stosowano kwas siarkowy i wapno, które to dodatki były przyczyną obserwowanych zakłóceń i uszkodzeń elementów silnika.

Z tego względu, przed wykonaniem oznaczenia liczby cetanowej na silniku badawczym wprowadzono kontrolę składu chemicznego każdej próbki monitorowanego oleju napędowego.

Po stwierdzeniu zastosowania niewłaściwego paliwa, przeglądowi poddano również komorę spalania silnika badawczego oraz zespół tłoka koła ręcznego – służący do zmiany objętości komory spalania, dla uzyskania znormalizowanego opóźnienia samozapłonu paliwa (rysunek 2).



Rys. 2. Pogładowy rysunek komory spalania silnika CFR Waukesha, wraz z zespołem tłoka koła ręcznego – służącego do zmiany objętości komory spalania

1 – pokrętło ręcznej blokady tłoka zmiany stopnia sprężania, 2 – pokrętło do ręcznego przesuwania tłoka zmiany stopnia sprężania, 3 – skala mikrometryczna zmiany stopnia sprężania, 4 – tłok zmiany stopnia sprężania, 5 – otwór czujnika ciśnienia spalania, 6 – wstępna komora spalania, 7 – głowica cylindra, 8 – zespół wtryskiwacza paliwa, 9 – cylinder, 10 – kanał łączący komorę wstępną z przestrzenią nad tłokiem (rys. norma ASTM D 613)

W komorze spalania oraz na denku tłoka koła ręcznego wykryto biały osad, potwierdzający zasilanie silnika badawczego paliwem pochodzącym z nielegalnego odbarwiania lekkiego oleju opałowego.

Przyjęto zatem, że w badaniach prowadzonych w ramach monitoringu paliw ocena właściwości chemicznych paliwa nastąpi przed wykonaniem badania silnikowego.

Należy tu nadmienić, że koszt jednego rozpylacza silnika badawczego CFR Waukesha do oznaczania liczby cetanowej jest zbliżony do wartości nowoczesnego układu wtryskowego *Common Rail* popularnego, czterocylindrowego samochodu osobowego.

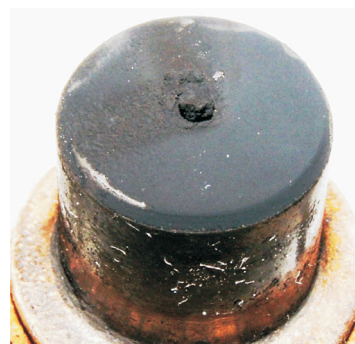
Dążenie do uzyskania niskiej toksyczności spalin doprowadziło do pojawienia się na polskim rynku różnych komponentów pochodzenia roślinnego mieszanych z paliwami węglowodorowymi – biopaliw. Sytuacja ta spowodowała zarówno coraz większy udział próbek biopaliw zleczonych do badań liczb oktanowych i liczby cetanowej przez zleceńdawców zewnętrznych, jak i próbek oznaczanych w ramach monitoringu paliw – zwłaszcza biodiesla B100.

Podczas oznaczeń liczb cetanowych olejów napędowych z biokomponentami oraz samych biokomponentów (biodiesel B100) stwierdzono konieczność zmian niektórych nastaw układu wtryskowego silnika – w porównaniu z typowymi dla badań oleju napędowego. Należało zwiększyć ilość podawanej dawki paliwa oraz kąt wyprzedzenia wtrysku, a także zmienić nastawy koła ręcznego, prowadzące do uzyskania zaleconego w normie ASTM D-613 kąta opóźnienia samozapłonu.

W miarę prowadzenia oznaczeń liczb cetanowych zaobserwowano pogarszanie się możliwości uzyskania znormalizowanego opóźnienia samozapłonu paliwa wtryskiwanego do komory spalania silnika badawczego. Pojawiły się również sygnały dźwiękowe pracy rozpylacza przy zimnym silniku (podczas uruchamiania). Badania kontrolne na paliwie wzorcowym według ASTM D-613 wykazały odchyłki powtarzalności oznaczonych wartości, przekraczające dopuszczalną wartość określoną w normie – przy jednoczesnym pogorszeniu stabilności odczytów wyprzedzenia wtrysku i opóźnienia samozapłonu paliwa. Wystąpiły także trudności ze zmianą objętości komory spalania silnika badawczego, spowodowane przez ciężko pracujące koło ręczne.

Podjęte czynności obsługowe silnika i jego osprzętu wykazały niewielkie zakokosowanie przy otworze czopika rozpylacza (fotografia 4) oraz nagar na denku i na ściankach bocznych tłoka koła ręcznego (fotografia 5).

Przegląd układu paliwowego wykazał niewielkie osady w zbiorniku zasilającym pompę wtryskową, rozpuszczenie



Fot. 4. Zakokosowanie otworu czopika rozpylacza silnika CFR Waukesha, służącego do oznaczania liczby cetanowej (fot. INiG Kraków)



Fot. 5. Nagar na denku i na ściankach bocznych tłoka koła ręcznego, służącego do zmiany objętości komory spalania silnika badawczego (fot. INiG Kraków)

lakieru ochronnego metalowych przewodów paliwowych oraz roszczenie (rozszczelnienie) zaworu paliwowego.

Sytuacja ta wskazuje, że zarówno podczas zasilania silnika badawczego olejami napędowymi z dodatkiem biokomponentów, jak i samymi biokomponentami, istnieje większe prawdopodobieństwo wystąpienia zanieczyszczenia układu paliwowego i komory spalania silnika przez intensywne osady – w porównaniu do zastosowania typowych olejów napędowych.

W związku z opisanymi obserwacjami skrócono zalecany przez normę ASTM D-613 okres wykonywanych czynności obsługowych silnika, a w celu potwierdzenia jego sprawności przystąpiono do międzynarodowego programu badawczego, sprawdzającego poprawność oznaczania przez silniki badawcze CFR Waukesha liczb cetanowych i oktanowych próbek paliw silnikowych, prowadzonego przez Energy Institute.

Energy Institute (EI) to brytyjski ośrodek badawczy, który powstał przez połączenie dwóch instytutów naukowych: Institute of Petroleum oraz Institute of Energy, wyodrębniając ze swojej struktury Energy Institute Laboratory Correlation Scheme (EILCS).

EILCS organizuje międzynarodowe badania okrężne paliw silnikowych związane z oznaczaniem liczb okta-

nowych i liczby cetanowej – przesyłając odpowiednie próbki w cyklu miesięcznym, a po otrzymaniu wyników dokonując ich analizy i opracowując w formie tabelarycznej comiesięczny raport, przesyłany następnie do ośrodków biorących udział w tym badaniu.

Dzięki dużej liczbie uczestników oraz długiemu okresowi trwania, badania te pozwalają na stałą i wiarygodną ocenę jakości prowadzonych oznaczeń – i zarazem na potwierdzenie opanowania warsztatu badawczego, a używane raporty cząstkowe umożliwiają bieżącą ocenę poprawności wykonywanych oznaczeń i stanowią cenną dokumentację biegłości laboratorium – zwłaszcza dla ośrodków posiadających akredytację.

Począwszy od stycznia 2010 roku, w międzynarodowych badaniach okrężnych umożliwiających bieżącą kontrolę jakości prowadzonych oznaczeń liczby cetanowej oraz liczb oktanowych uczestniczy również Laboratorium Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG. W ramach badań porównawczych – zgodnie z przyjętym harmonogramem – próbki do oznaczeń LOB, LOM i LC dostarczane są raz na dwa miesiące. Według założeń EI na 2010 rok, w badaniach tych uczestniczy 95 laboratoriów z całego świata, w tym: 42 w zakresie oznaczania liczby oktanowej badawczej, 34 w zakresie oznaczania liczby oktanowej motorowej i 19 w zakresie oznaczania liczby cetanowej. Badania EI prowadzone są zgodnie z normami: ASTM D 613-01/IP 41-99 (liczba cetanowa), ASTM D 2699-04 (badawcza liczba oktanowa) i ASTM D 2700-04 (motorowa liczba oktanowa).

Kod każdej z próbek składa się z dużej litery **M** lub **D** i następujących po niej czterech cyfr. Litera **M** wskazuje, że jest to próbka paliwa do oznaczania LOB i LOM, natomiast litera **D** oznacza olej napędowy do badania LC.

Po dużej literze M lub D następują cztery kolejne cyfry, z których pierwsze dwie podają rok prowadzenia badań, a następne dwie określają miesiąc, którego dotyczy próbka. Oznaczanie odpowiednich próbek prowadzone jest w INiG

każdego miesiąca. Następnie, sukcesywnie, odpowiednie protokoły z uzyskanymi wynikami przesyła się do Energy Institute w Wielkiej Brytanii. Mniej regularnie nadsyłane są cząstkowe raporty z oceny badań, przygotowane przez Energy Institute Laboratory Correlation Scheme (średnio dwa miesiące po przeprowadzeniu oznaczenia), a końcowego raportu za 2010 rok należy się spodziewać w marcu 2011 roku (podobnie jak w przypadku raportu z badań za rok 2009, przysłanego w marcu 2010 r.).

W czasie trwania badań należy ściśle przestrzegać wykonywania czynności obejmujących okresowe obsługi silników oraz wzorcowania określone procedurami badawczymi – jest to wymóg, który musi spełnić każde z laboratoriów uczestniczących w międzynarodowym programie badań organizowanym przez EILCS.

Oprócz podania wyników oznaczania LC, LOB i LOM próbek paliw silnikowych dostarczanych w miesięcznych partiach przez EILCS, wymagane jest także przesłanie parametrów pracy silników testowych CFR Waukesha, przy których badania te zostały przeprowadzone. Parametrami takimi są:

- ciśnienie atmosferyczne,
- temperatura otoczenia,
- temperatura powietrza zasysanego przez silniki do oznaczania LOB i LOM,
- temperatura mieszanki paliwowo-powietrznej (dotyczy LOM),
- wilgotność powietrza (dotyczy LC),
- wartości paliw wzorcowych zastosowanych do sprawdzenia jednostek badawczych,
- całkowita ilość godzin pracy silników badawczych na stanowiskach,
- czas jaki upłynął od ostatniego czyszczenia wtryskiwacza paliwa (dotyczy LC), gaźnika (dotyczy LOB/M) i ostatniej obsługi serwisowej silników CFR Waukesha – do momentu oznaczania próbek paliw silnikowych.

### Wyniki badań

Oceniając cały okres prowadzenia oznaczeń LOB, LOM i LC należy stwierdzić, że nie zaobserwowano innych istotnych problemów, które w konsekwencji mogłyby wpłynąć na powstanie odstępstw uzyskiwanych wyników, znacznie przekraczających wartość średniego odchylenia standardowego, a zwłaszcza dopuszczalnych granic odwarzalności.

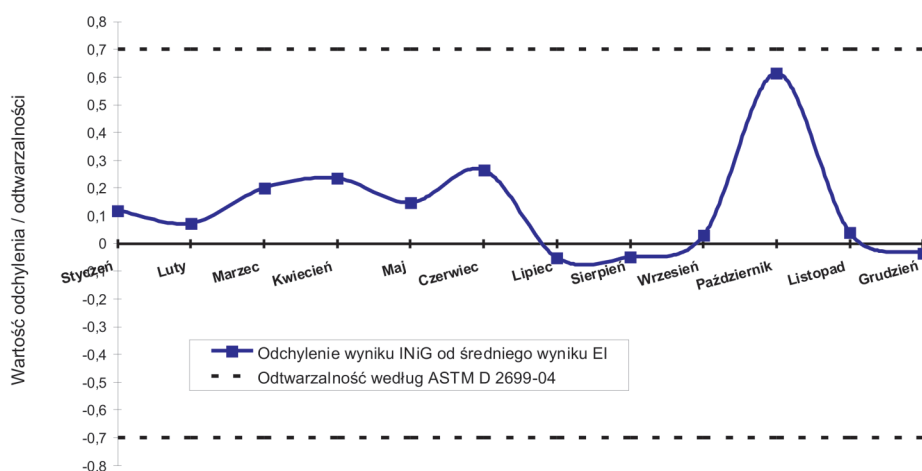
Porównanie wyników uzyskanych przez INiG w 2009 roku z wynikami uśrednionymi w ramach międzynarodowych badań okrężnych (które określono na drodze obróbki

statystycznej wykonanej przez EI) przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5.

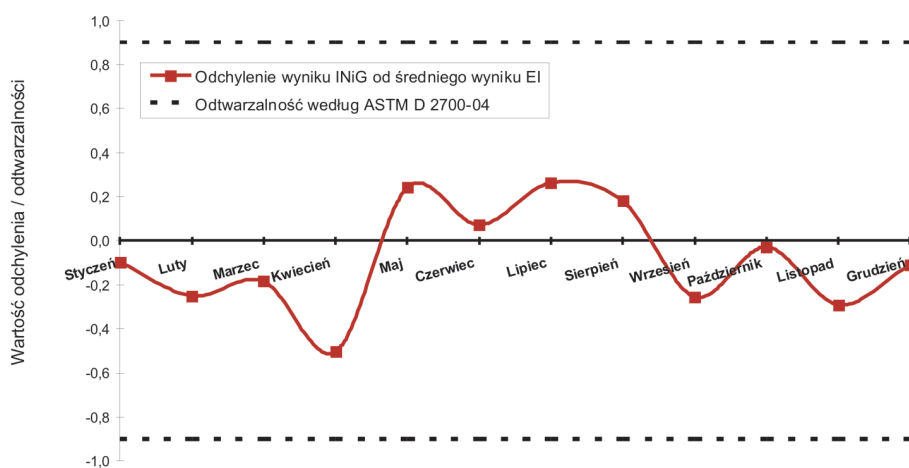
Należy stwierdzić, że wszystkie oznaczenia liczb oktanowych i liczby cetanowej wykonane przez Laboratorium Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG w ramach międzynarodowych badań porównawczych EI w 2009 roku nie budzą żadnych zastrzeżeń.

Warto również zauważyć, że w przypadku oznaczania liczb cetanowych, odchylenie wyniku INiG od średniego rezultatu EI uzyskanego w danym miesiącu mieści się nie

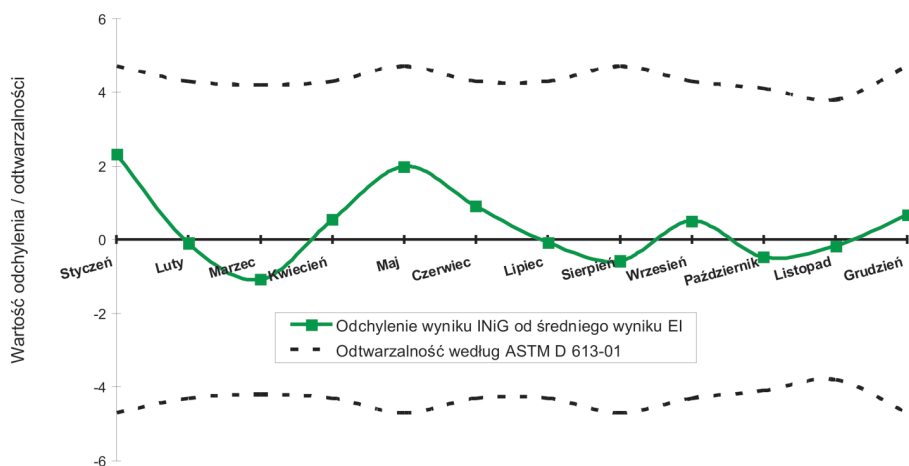
tylko w granicy odtwarzalności, ale też – w większości przypadków – w granicy powtarzalności, określonej na podstawie interpolacji liniowej wyników podanych przez ASTM D 613-01.



Rys. 3. Porównanie wyników INiG uzyskanych w 2009 roku z wynikami uśrednionymi w ramach międzynarodowych badań okrężnych, które określono na drodze obróbki statystycznej, wykonanej przez EI dla liczb oktanowych badawczych



Rys. 4. Porównanie wyników INiG uzyskanych w 2009 roku z wynikami uśrednionymi w ramach międzynarodowych badań okrężnych, które określono na drodze obróbki statystycznej, wykonanej przez EI dla liczb oktanowych motorowych



Rys. 5. Porównanie wyników INiG uzyskanych w 2009 roku z wynikami uśrednionymi w ramach międzynarodowych badań okrężnych, które określono na drodze obróbki statystycznej, wykonanej przez EI dla liczb cetanowych

## Podsumowanie

Uzyskane w trakcie badań międzylaboratoryjnych porównawcze dane statystyczne umożliwiają monitorowanie poprawności działania testowych stanowisk silnikowych i zgodności wykonywania badań z odpowiednimi procedurami. Uzyskane wyniki są miarodajnym potwierdzeniem wiarygodności rezultatów uzyskiwanych w Laboratorium Badań Silnikowych i Trybologicznych Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych INiG. Można zatem stwierdzić, że podjęte działania prewencyjne, zabezpieczające podczas oznaczania liczb cetanowych przed użyciem paliwa niewłaściwej jakości, przyniosły oczekiwane wyniki. Udział w międzynarodowych badaniach porównawczych, w zakresie oznaczania LC, LOB i LOM paliw silnikowych, pozwala uczestniczącym w nich

laboratoriom silnikowym na sprawdzenie własnej biegłości, usprawnienie obsługi i regulacji stanowisk badawczych oraz na stopniową poprawę precyzji wyników oznaczeń liczby cetanowej i liczb oktanowych.

Każde renomowane laboratorium badawcze wykonujące oznaczania liczb oktanowych i liczby cetanowej paliw silnikowych powinno uczestniczyć w międzylaboratoryjnych badaniach okrężnych, potwierdzających jego biegłość – przede wszystkim ze względu na ciągły rozwój technologii paliw oraz możliwość systematycznej, kompleksowej kontroli uzyskiwanych wyników badań, przez porównanie ich poziomu i precyzji z wynikami innych renomowanych laboratoriów z całego świata.

Artykuł nadesłano do Redakcji 21.12.2010 r. Przyjęto do druku 8.03.2011 r.

Recenzent: prof. dr Michał Krasodomski

## Literatura

- [1] ASTM D 2699-04 *Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel.*
- [2] ASTM D 2700-04 *Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel.*
- [3] ASTM D 613-01 *Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil.*
- [4] Dybich K.: *Badania liczb oktanowych (badawczej, motorowej) i liczby cetanowej w międzynarodowych badaniach porównawczych.* Dokumentacja INiG, Nr arch.: DK-4100-84/09.
- [5] Stępień Z.: *Sprawdzenie powtarzalności i odtwarzalności wyników oznaczania liczb oktanowych (badawczej, motorowej) i liczby cetanowej w międzynarodowych badaniach*

*porównawczych organizowanych przez Institute of Petroleum (Wielka Brytania) w 2005 roku.* Dokumentacja ITN nr 3950/2006.



Mgr inż. Kornel DYBICH – ukończył studia o specjalności silniki spalinowe, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z oceną parametrów użytkowych paliw silnikowych na stanowiskach hamownianych.