

DEVELOPMENT OF LABORATORY TESTS FOR DIESEL FUEL LUBRICITY EVALUATION

Małgorzata Wojtyniak

Technical University of Radom

Al. Chrobrego 45, 26-600 Radom, Poland

tel.: +48 3617671 fax: + 48 3617644

e-mail: malgorzata_wojtyniak@op.pl

Abstract

The paper presents concept of lubricity and describes problem of insufficient lubricity properties of low-sulfur diesel fuel and necessity to assess these properties. A history of development in the field of diesel fuel lubricity tests is presented. There are characterized such laboratory tests as: Lucas Dwell Test, Lucas Four-Ball Test, TAFLE, BOCLE, HFRR, SLBOCLE, BOCLE (Lubrizol/Hadley) BOTD, Plint TE-77 as well as a test developed by the author – based on physicochemical model of the running-in process in the system: metal - lubricating medium - metal.

ROZWÓJ LABORATORYJNYCH METOD BADANIA WŁAŚCIWOŚCI SMARNYCH OLEJU NAPĘDOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono pojęcie smarności oraz omówiono problem niedostatecznych właściwości smarnych niskosiarkowego oleju napędowego i konieczność stosowania metod oceny tych właściwości. Przedstawiono historię rozwoju metod badania smarności oleju napędowego. Scharakteryzowano takie metody stosowane do oceny właściwości smarnych jak: Lucas Dwell Test, Lucas Four-Ball Test, TAFLE, BOCLE, HFRR, SLBOCLE, BOCLE (Lubrizol/Hadley) BOTD, Plint TE-77 oraz opracowaną przez autorkę metodę opartą na fizykochemicznym modelu procesu zacierania w układzie metal - środek smarujący - metal.

1. Wprowadzenie

Termin „smarność” został wprowadzony po koniec dziewiętnastego wieku przez A. Kingsburry’ego [11] jako właściwość smaru niezależna i odmienna od lepkości, polegająca na zmniejszaniu oporów tarcia w warunkach tarcia półsuchego i był stosowany wówczas tylko w odniesieniu do olejów mineralnych. Wraz z rozwojem nauki pojęcie to uległo pewnym zmianom, jednak do dnia dzisiejszego nie opracowano jednoznacznej definicji smarności i miary tej wielkości. Według R. Marcza [16] na smarność składa się zespół zjawisk i procesów zachodzących w obszarze tarcia, których przebieg zależy od rodzaju: cieczy smarującej, trących ciał stałych i atmosfery. W literaturze dotyczącej właściwości smarnych paliw płynnych wielu autorów powołuje się na definicję podaną w 1966 roku przez Appeldoorna i Dukek’a [2], w odniesieniu do ciekłych paliw węglowodorowych. Według tej definicji: „jeżeli dwie ciecze mają taką samą lepkość i jedna z nich powoduje mniejsze tarcie i zużycie, to można o niej powiedzieć, że ma lepszą smarność”.

Smarność nie jest cechą fizyczną paliwa. Jest to pewne pojęcie umowne, wskazujące na zdolność do tworzenia warstw granicznych, zabezpieczających przed nadmiernym zużywaniem. W odróżnieniu od lepkości, która jest własnością indywidualną paliwa, smarność jest cechą zespołową - cechą systemu tribologicznego, gdyż zależy od zespołu zjawisk zachodzących w obszarze tarcia. Smarowanie jest niedostateczne, gdy nie wytwarza

się odpowiednio wytrzymały film graniczny zdolny całkowicie oddzielić przemieszczające się względem siebie powierzchnie.

Problem smarności spowodowany stosowaniem paliw po raz pierwszy pojawił się w latach sześćdziesiątych XX wieku i dotyczył uszkodzeń elementów aparatury wtryskowej silników lotniczych [1]. Później, podczas wojny w Wietnamie użytkownicy samolotów z silnikami turboodrzutowymi doświadczyli podobnych problemów wynikłych z jakości stosowanego paliwa. Rozpoczęto wówczas prace nad opracowaniem laboratoryjnej metody badania smarności paliwa lotniczego. Jednym z pierwszych testowanych urządzeń był tribometr Dennisona [13]. Wyniki badań paliwa lotniczego za pomocą tego aparatu wykazywały jednak słabą korelację z wynikami badań eksploatacyjnych.

Problem niedostatecznych właściwości smarnych oleju napędowego pojawił się na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku (najpierw w Stanach Zjednoczonych, a potem w Szwecji) i został pośrednio spowodowany działaniami proekologicznymi zmierzającymi do ograniczenia emisji toksycznych składników spalin z pojazdów [21]. W ramach tych działań dąży się, między innymi, do obniżenia zawartości siarki i węglowodorów aromatycznych (głównie dwu- i trójpięścieniowych) w oleju napędowym. W procesie hydrowy rafinacji, stosowanym powszechnie przez przemysł rafineryjny do usuwania związków siarki z oleju napędowego, usuwane są również naturalnie występujące w tym paliwie związki nadające mu odpowiednie właściwości smarne. Negatywnym skutkiem takich działań jest więc obniżenie smarności [22]. Stosowanie takiego oleju napędowego powoduje przedwczesne zużywanie aparatury wtryskowej silników wysokoprężnych, głównie – pomp wtryskowych rozdzielaczowych.

Wraz z pojawieniem się problemu zwiększonego zużycia elementów aparatury wtryskowej pojawiła się konieczność opracowania i znormalizowania metod oceny właściwości smarnych oleju napędowego.

2. Laboratoryjne metody badania właściwości smarnych oleju napędowego

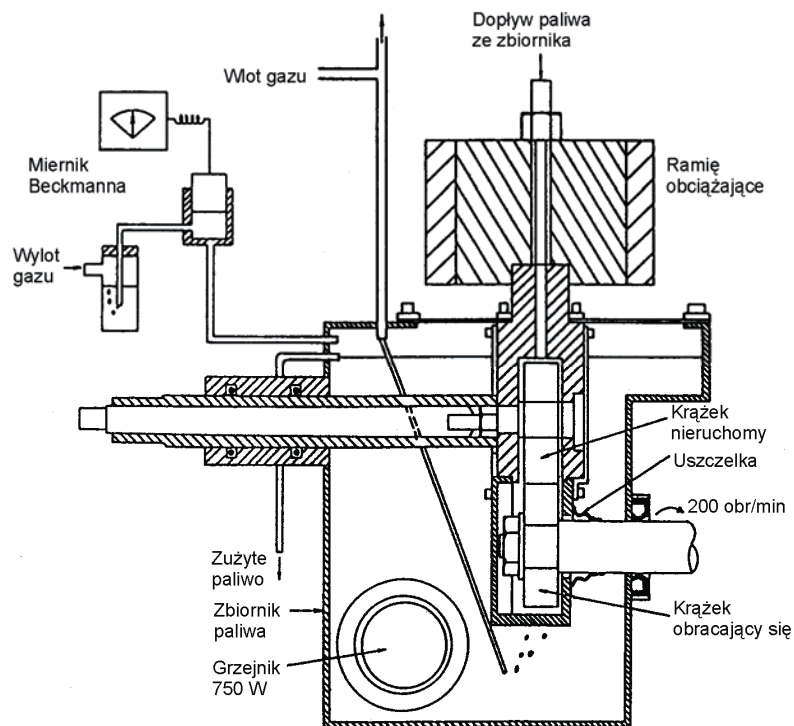
Badania smarności paliw prowadzi wiele ośrodków naukowych; głównie w Europie i w Ameryce Północnej. W ich wyniku opracowano szereg metod badawczych, z których najbardziej znane to: Lucas Dwell Test, Lucas Four-Ball Test, TAFLE (Thornton Aviation Fuel Lubricity Evaluator), BOCLE (Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator), SLBOCLE (Scuffing Load BOCLE), BOCLE (Lubrizol/Hadley), HFRR (High Frequency Reciprocating Rig), BOTD (Ball-on-Three Discs), Plint TE-77.

W 1971 roku R.T. Aird [1] opracował tzw. **Lucas Dwell Test**, który był jednym z pierwszych testów przeznaczonych do badania smarności paliw. Skojarzenie trące stanowi w tej metodzie metalowy trzpień (wykonany z różnych materiałów) dociskany do obracającego się stalowego dysku, na który naniesiony jest film paliwowy. Miarą smarności paliwa jest liczba obrotów dysku do chwili, gdy współczynnik tarcia osiągnie wartość 0.4 (określa się ją jako dwell number). Im większa jest ta liczba, tym większa jest smarność paliwa. Metoda ta zyskała pewną popularność w latach siedemdziesiątych, głównie w Wielkiej Brytanii. Jednakże później, zainteresowanie nią bardzo zmalało ze względu na małą korelację z wynikami badań eksploatacyjnych. Mała też jest precyzja tej metody.

Badanie smarności metodą **Lucas Four-Ball** jest przeprowadzane zgodnie z normą ASTM D 2783 w aparacie czterokulowym [18]. Jeden bieg badawczy trwa 10 sekund, a prędkość obrotowa kulki górnej wynosi 1425 obr/min. Przyjęte w badaniu obciążenia wężła tarcia wynoszą: 58.86, 78.48, 98.10, 127.53, 156.96, 196.20, 235.44 i 313.92 N. Wyniki przedstawia się w postaci maksymalnych obciążeń, przy których nie występują jeszcze objawy zatarcia oraz nacisków jednostkowych przy tych obciążeniach. Test ten jest rzadko stosowany.

W 1985 roku J.W. Hadley (Shell Research) [9] skonstruował, na bazie maszyny AMSLER, aparat **TAFLE** (Thornton Aviation Fuel Lubricity Evaluator). Kolejne wersje robocze tego aparatu nosiły nazwy Mark I, Mark II, Mark III i Mark IV. Skojarzenie trące aparatu TAFLE stanowią dwa krążki stalowe o różnej twardości i chropowatości powierzchni. Skojarzenie to daje styk liniowy. Górny, nieruchomy krążek jest dociskany do obracającego się krążka dolnego. Badanie polega na sekwencji 5 minutowych biegów maszyny przy zwiększającym co 98.1 N obciążeniu. Pomiary prowadzone są do zatarcia lub osiągnięcia granicznej nośności urządzenia, która wynosi 1962 N. Po każdym pomiarze górny krążek jest obracany o 5° , aby umożliwić kontakt obu krążków na nowej powierzchni. Podczas każdego biegu mierzone są opory tarcia na dolnym krążku. Ważnym elementem urządzenia TAFLE jest układ paliwowy. Paliwo przepływa przez komorę, w której znajdują się krążki, omywając skojarzenie trące. Po przejściu przez komorę paliwo jest usuwane z obiegu. Smarności według tego testu określa się na podstawie obciążenia, przy którym wartość współczynnika tarcia jest większa lub równa 0.4. Schemat aparatu TAFLE przedstawia rys. 1.

Tak jak i Lucas Dwell Test, aparat TAFLE nigdy nie był powszechnie stosowany ze względu na duży koszt i skomplikowaną procedurę badawczą. Wadą tej metody jest długi czas oznaczenia, który wynosi około 8 godzin. Jednakże, w pojedynczych przypadkach, aparat ten był z powodzeniem stosowany do lat dziewięćdziesiątych (np. w Szwecji - do oceny smarności niskosiarkowych olejów napędowych) [21]. Istnieje tylko jeden egzemplarz tego aparatu.



Rys.1. Schemat aparatu TAFLE [9]
Fig.1. TAFLE device scheme [9]

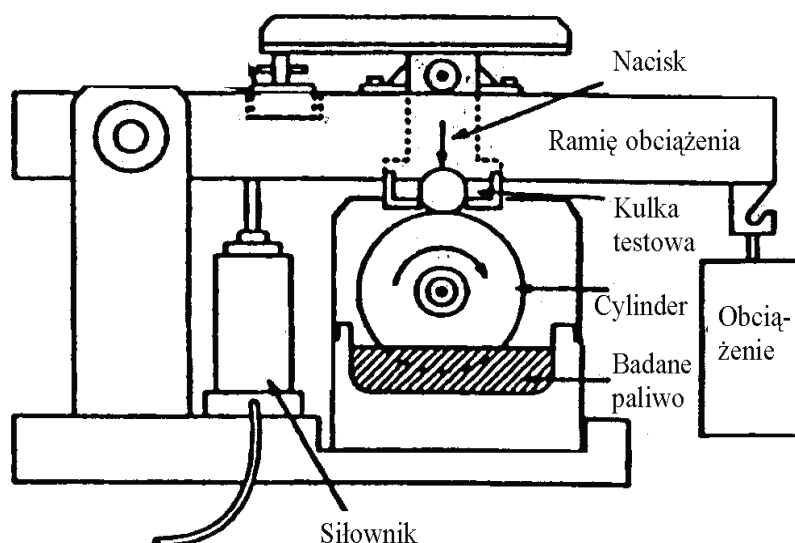
W roku 1969 Brytyjskie Ministerstwo Obrony stworzyło specjalną grupę badawczą w celu opracowania znormalizowanej metody badania smarności paliwa lotniczego. W wyniku przeprowadzonych badań uznano, że skonstruowany przez M. Furey'a (w ramach badań nad tarcie granicznym smarów) w 1961 roku, a następnie zmodyfikowany przez firmę Esso (USA), aparat **BOCLE** [20, 12] najlepiej nadaje się do tego celu. W latach 1968--1990

metoda BOCLE była modyfikowana przynajmniej pięciokrotnie. W 1989 roku została wprowadzona norma ASTM na oznaczanie smarności paliwa lotniczego tą metodą [4].

Test BOCLE polega na pomiarze średnicy skazy powstającej podczas współpracy obciążonej kulki z obracającym się cylindrem, zanurzonym częściowo w badanym paliwie. Miarą zużycia jest średnica skazy powstałej na kulce. Aparat BOCLE jest stosowany głównie do badania paliw lotniczych.

W wyniku prac sponsorowanych przez Armię Stanów Zjednoczonych (po operacji „Pustynna Burza”, podczas której zanotowano wiele przypadków uszkodzenia aparatury wtryskowej), w 1994 roku P.I. Lacey [14] zmodyfikował metodę BOCLE tak, aby umożliwiała ona ocenę właściwości smarnych oleju napędowego. Modyfikacja ta dotyczy zarówno węzła tarcia, jak i warunków prowadzenia pomiaru oraz kryterium oceny. W nowej metodzie, pod nazwą **SLBOCLE** (Scuffing Load BOCLE), nazywanej również U.S. Army Scuffing Load Wear Test (U.S. Army SLWT), wyznaczane jest obciążenie zacierające. W teście tym stosuje się pierścien polerowany zamiast szlifowanego. Obciążenie, z jakim kulka jest dociskana do pierścienia, wzrasta w sposób sekwencyjny. Miarą smarności jest najniższe obciążenie powodujące wzrost współczynnika tarcia pomiędzy kulką a cylindrem powyżej wartości 0.175. Metoda SLBOCLE jest rozpowszechniona głównie w Stanach Zjednoczonych. W roku 1999 wprowadzono normę ASTM na oznaczanie smarności oleju napędowego metodą SLBOCLE [5].

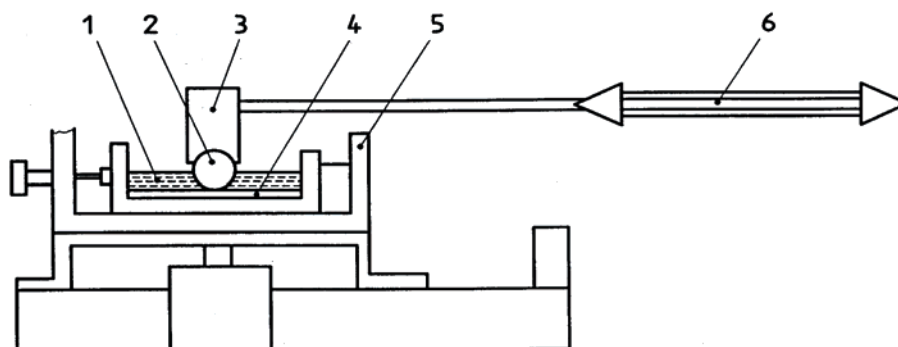
Inna modyfikacja metody BOCLE została opracowana przez J.W. Hadley'a [8]. Nosi nazwę **BOCLE (Lubrizol/Hadley)**. W metodzie tej badanie prowadzi się pod stałym obciążeniem (68.67 N) w ciągu 45 minut. Zwiększona została również prędkość obrotowa pierścienia (do 300 obr/min). Metoda ta jest rzadko stosowana.



Rys. 2. Schemat aparatu SLBOCLE [5]
Fig. 2. SLBOCLE device scheme [5]

W roku 1986 H.A. Spikes i D. Wei [23] skonstruowali urządzenie **HFRR** (High Frequency Reciprocating Rig) – aparat o ruchu posuwisto-zwrotnym wysokiej częstotliwości - do badania smarności olejów napędowych. Metoda HFRR została rozpowszechniona po zmianach wprowadzonych przez C. Bovingtona [6]. Badanie polega na wzbudzeniu poziomych drgań kulki stalowej, obciążonej od góry, po nieruchomej płycie stalowej (wykonanej z tego samego materiału, ale o mniejszej twardości) zanurzonej w paliwie. Badania wykonuje się w temperaturze 25°C i 60°C. Miarą zużycia jest skorygowana (do

wartości w warunkach normalnego ciśnienia pary wodnej, równego 1.4 kPa) średnica skazy na kulce, oznaczana jako WS1,4 (Wear Scar). Przyjmuje się, że średnica ta nie powinna przekraczać 380 μm (w temperaturze 25°C) i 460 μm (w temperaturze 60°C). Urządzenie jest sterowane komputerem. Wykonanie jednego oznaczenia trwa około 2 godzin. Sposób oznaczania smerności oleju napędowego tą metodą opisują normy ASTM [3] i ISO [10]. W Polsce również obowiązuje norma na oznaczanie smerności metodą HFRR [19]. Schemat aparatu HFRR przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat aparatu HFRR [10]

Oznaczenia: 1 – zbiornik paliwa, 2 – kulka testowa, 3 – obciążnik, 4 – płytki testowa, 5 – łaźnia podgrzewająca paliwo, 6 – wzбудnik oscylacyjny

Fig. 3. HFRR device scheme [10]

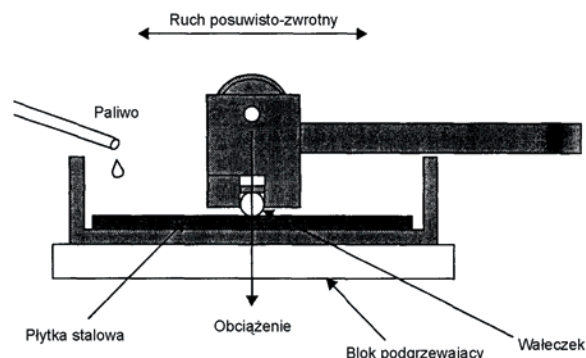
Notations: 1 – fuel bath, 2 – test ball, 3 – applied load, 4 – test plate, 5 – heating bath, 6 – oscillating motion

Test **BOTD** jest zmodyfikowaną (przez firmę Falex) [25] wersją powszechnie znanego testu w aparacie czterokulowym. W węźle tarcia, trzy nieruchome kulki zastąpiono trzema krążkami stalowymi. W początkowej wersji urządzenie to nosiło nazwę **BOTS** (Ball-on-Three Seats) i nieruchome kulki były w nim zastąpione sferycznymi wkładkami. Ze względu na trudności związane z uzyskaniem odpowiedniej geometrii wkładek w zmodyfikowanej wersji urządzenia zastosowano stalowe krążki. Krążki te są dociskane do obracającej się ceramicznej kulki. Miarą smerności jest średnica śladu zużycia krążków. Test ten jest najbardziej popularny w Stanach Zjednoczonych. Norma ASTM opisująca oznaczanie smerności oleju napędowego za pomocą testu BOTD jest obecnie opracowywana.

W metodzie opracowanej przez firmę Plint & Partners Ltd. do badania smerności olejów napędowych zastosowano zmodyfikowaną maszynę tarciovą **Plint TE-77** [7]. Parę tarciovą stanowi w tej maszynie stalowy wałeczek poruszający się ruchem posuwisto-zwrotnym po płytce wykonanej z tego samego materiału, zwilżanej badanym paliwem. W odróżnieniu od większości metod badania smerności w skojarzeniu tym występuje styk liniowy. Za miarę smerności przyjmuje się głębokość śladu zużycia na płytce stalowej. Jako paliwa o zbyt niskiej smerności uznaje się te, dla których parametr ten ma wartość większą niż 15 μm . Schemat maszyny Plint TE-77 przedstawiono na rysunku 4.

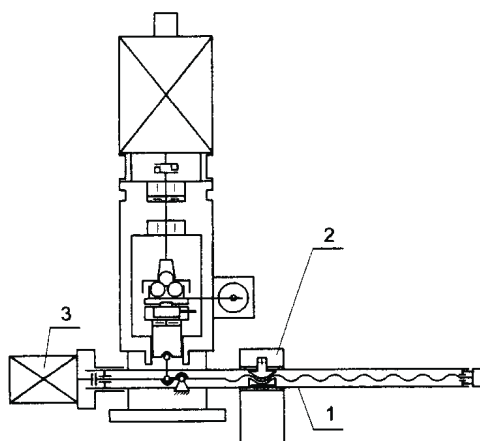
Metoda oceny właściwości smarnych oleju napędowego za pomocą zmodyfikowanego aparatu czterokulowego T-02 została opracowana w Politechnice Radomskiej [24]. Koncepcja tej metody wykorzystuje fizykochemiczny model procesów zacierania i docierania w układzie: metal – środek smarujący – metal, zachodzących w styku skoncentrowanym, w aparacie czterokulowym, do oceny właściwości smarnych oleju napędowego. W metodzie tej przyjęto dwa kryteria oceny właściwości smarnych olejów napędowych: trwałość warstwy granicznej oraz zdolność warstwy granicznej do odbudowywania się w węźle tarcia aparatu czterokulowego. Zmodyfikowany aparat T-02, dzięki zastosowanemu systemowi sterująco-

-pomiarowemu, pozwala na prowadzenie badań w warunkach ciągłego, liniowego wzrostu obciążenia w czasie biegu badawczego. Schemat tego aparatu przedstawia rysunek 5.



Rys. 4. Schemat maszyny Plint TE-77 [7]
 Fig. 4. Plint TE-77 machine scheme [7]

Istota metody polega na bezpośrednim pomiarze wartości siły niezbędnej do przzerwania ciągłości warstwy granicznej (inaczej – wyznaczeniu wartości obciążenia zacierającego) oraz skutków procesu zużywania pod tym obciążeniem, wyrażonych wielkością średnicy skazy zużycia po zakończonym biegu badawczym. Ponieważ najbardziej istotną cechą przyjętego w tej metodzie modelu procesu zacierania jest trwałość warstw granicznych tworzących się na powierzchniach elementów współpracujących, dlatego też metodę nazwano **MFPCWSSS** - Metodą Fizycznego Przerwania Ciągłości Warstwy Smarnej w Styku Skoncentrowanym. Wartość obciążenia zacierającego wyznacza się zgodnie z normą PN-76/C-04147. Podczas badania rejestrowane są: współczynnik tarcia, moment tarcia, obciążenie nadane oraz temperatura badanej próbki. Wielkość zużycia (średnicę śladu zużycia) elementów węzła tarcia aparatu czterokulowego T-02 powstającego wskutek prowadzenia procesu tarcia przy stałym obciążeniu nadanym równym obciążeniu zacierającemu wyznacza się prowadząc badanie w czasie 30 sekund.



Rys. 5. Schemat kinematyczny aparatu T-02 w wersji zmodyfikowanej. Oznaczenia: 1 – dźwignia, 2 – obciążnik, 3 – dodatkowy silnik
 Fig. 5. Scheme of the modified T-02 tester. Notations: 1 – lever, 2 – weight, 3 – additional engine

Miarą smerności, według tej metody, jest nacisk nominalny w strefie kontaktu po dotarciu układu przy obciążeniu nadanym równym obciążeniu zacierającemu. Im wyższy nacisk nominalny tym lepsza (wyższa) smarność. Nacisk ten oblicza się ze wzoru:

$$p = 0.52 \frac{P_t}{d^2},$$

w którym: d – średnica śladu zużycia [mm]; P_t – obciążenie zacierające [N].

Współczynnik 0,52 wynika z rozkładu sił w węzle tarcia aparatu czterokulowego.

Badania niskosiarkowych olejów napędowych z różną zawartością typowych, handlowych dodatków smarnościowych przeprowadzone za pomocą tej metody pozwoliły na rozróżnienie wszystkich badanych kompozycji olej – dodatek pod względem właściwości smarnych [15].

3. Podsumowanie

Obecnie, smarność jest jednym z parametrów jakościowych, który musi być uwzględniany przez przemysł rafineryjny. Laboratoryjną ocenę właściwości smarnych olejów napędowych przeprowadza się najczęściej dwiema metodami: HFRR i SLBOCLE. Większą popularnością cieszy się metoda HFRR. Do popularyzacji tej metody przyczyniły się badania międzylaboratoryjne prowadzone w latach 1992-1995 przez stowarzyszenie SAE oraz Europejską Radę Koordynacyjną (CEC) pod patronatem ISO [17]. Metoda SLBOCLE jest stosowana głównie w Stanach Zjednoczonych. Według stanowiska ASTM – żadna z istniejących obecnie normowych metod nie pozwala na ocenę smarności we wszystkich przypadkach paliwo/dodatek. Metody te nie są również czułe na wykrywanie obecności dodatku w niskim stężeniu. Nie istnieje korelacja pomiędzy wynikami uzyskiwanymi za pomocą tych metod.

Wyniki wykazujące silną korelację z wynikami badań stanowiskowych i eksploatacyjnych uzyskiwano stosując aparat TAFLE [21]. Jednakże, ze względu na skomplikowaną procedurę i długi czas badania, aparat ten nie nadaje się do rutynowej kontroli jakości i nigdy nie był brany pod uwagę przy opracowywaniu metod normowych.

Wymagania dotyczące zawartości siarki w oleju napędowym zakładają, że od 2006 roku w Stanach Zjednoczonych (a od 2009 roku w krajach Unii Europejskiej) na rynku będzie tylko „bezsiaarkowy” olej napędowy. Przewiduje się, że pewną część tego paliwa będzie stanowił olej otrzymywany według technologii GTL (gas-to-liquid) z gazu naturalnego. Olej taki charakteryzuje się bardzo niską smarnością i konieczne jest stosowanie do niego dodatków smarnościowych. Producenci silników i aparatury wtryskowej wyrażają swoje obawy, co do odpowiednich właściwości smarnych paliw GTL oraz metod ich oceny. Domagają się opracowania bardziej precyzyjnych metod badawczych oraz wprowadzenia poprawek do obowiązujących norm. W odpowiedzi na takie stanowisko, ASTM prowadzi badania między laboratoryjne w celu opracowanie metody badania smarności, która będzie się charakteryzowała wysoką precyzją i zdolnością do rozróżniania wszystkich kombinacji paliwo/dodatek. Do oceny wybrano: test BOTD, zmodyfikowany test HFRR oraz 500 godzinny test stanowiskowy (oparty na teście firmy Stanadyne).

4. Literatura

- [1] Aird R. T., Forgham S. L., The lubricating quality of aviation fuels. *Wear* 1971, Vol. 18, p. 361-380, 1971.
- [2] Appeldoorn J. K., Dukek W. G., Lubricity of jet fuels. SAE Paper 660712, 1966.
- [3] ASTM 6079-99, Standard test method for evaluating lubricity of diesel fuels by the high-frequency reciprocating rig (HFRR).
- [4] ASTM D 5001-89, Test method for measurement of lubricity of aviation turbine fuels by the ball-on-cylinder evaluator (BOCLE), 1989.

- [5] ASTM D 6078-99, Evaluating lubricity of diesel fuels by the scuffing load ball-on-cylinder lubricity evaluator (SLBOCLE), 1999.
- [6] Bovington C., Caprotti R., Meyer K., Spikes H. A., Development of a laboratory test to predict lubricity properties of diesel fuels and its application to the development of highly refined fuels. Tribotest 1995, Vol. 2, No. 2, p. 93-112, 1995.
- [7] Cooper D., Laboratory screening tests for low sulfur diesel fuel lubricity. Lubrication Science 1995, Vol. 7, No. 2, p. 133-148, 1995.
- [8] Hadley J. W., Blackhurst P., An appraisal of the ball-on-cylinder technique for measuring aviation turbine fuel lubricity. Lubrication Engineering 1991, Vol. 47, No. 5, p. 404-411.
- [9] Hadley J. W., A method for the evaluation of the boundary lubricating properties of aviation turbine fuels. Wear 1985, Vol. 101, p. 219-253, 1985.
- [10] ISO 12156, Diesel fuel – Assessment of lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR).
- [11] Kingsburry A., Experiments of friction of screw. Transactions of American Society of Mechanical Engineers 1996, Vol. 7, p.152-158, 1996.
- [12] Kolczyński J., Ocena aparatem BOCLE. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji 1996, Nr 29, s. 12-19, 1996.
- [13] Lacey P. I., Howell S.A., Fuel lubricity reviewed. 1998 SAE Transactions, Journal of Fuels & Lubricants, Paper 982567, p. 1461-1479, 1998.
- [14] Lacey P. I., Development of a lubricity test based on the transition from boundary lubrication to severe adhesive wear in fuels. Lubrication Engineering 1994, Vol. 507, No. 10, p. 749-757, 1994.
- [15] Marczak R., Wojtyniak M., Symulacyjne badania właściwości smarych olejów napędowych. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Kraków 2003, Zeszyt Nr 26-27, s. 271-277, 2003.
- [16] Marczak R., Trybologiczne własności materiałów łożyskowych. Praca habilitacyjna. Informator WITPiS nr 21/77, Sulejówek 1977.
- [17] Nikanjam M., Crosby T., Henderson P., Gray C., Meyer K., Davenport N., ISO diesel fuel lubricity round robin program. 1995 SAE Transactions, Journal of Fuels and Lubricants, Paper 952372, p. 1019-1042, 1995.
- [18] Oleksiak S., Skręt I., Własności smarne olejów napędowych w świetle najnowszych wymagań europejskich i amerykańskich. Materiały konferencyjne. KONMOT '96, s. 159-168, 1996.
- [19] PN-EN-ISO 12156, Przetwory naftowe. Oleje napędowe. Ocena smarności przy zastosowaniu aparatu o ruchu posuwisto-zwrotnym wysokiej częstotliwości (HFRR).
- [20] Tao F. F., Appeldoorn J.K., The ball-on-cylinder test for evaluating jet fuel lubricity. ASLE Transactions 1968, Vol. 11, p. 345-352, 1968.
- [21] Tucker R. F., Stradling R. J., Wolveridge P. E., Rivers K. J., Ubbens A., The lubricity of deeply hydrogenated diesel fuels – the Swedish experience. SAE Paper 942016, Diesel fuel: additives and performance, Warrendale, PA, SAE, p. 1617-1633, 1994.
- [22] Wei D., Spikes H. A., Fuel lubricity – fundamentals and review. Fuels International, October 2000, Vol. 1, No. 1, p. 45-65, 2000.
- [23] Wei D., Spikes H. A., The lubricity of diesel fuels. Wear 1986, Vol. 111, p. 217-235, 1986.
- [24] Wojtyniak M., Metoda badania właściwości smarych olejów napędowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Radomska, Radom 2003.
- [25] www.falexint.com.