

ZMIANY LEPKOŚCI OLEJÓW SILNIKOWYCH W CIĄGNIKACH ROLNICZYCH

Streszczenie

W artykule omówiono istotne zagadnienia dotyczące zmian lepkości dynamicznej i kinematycznej olejów silnikowych w czasie eksploatacji pojazdów rolniczych, ich monitorowania oraz służących do tego celu narzędzi. Zwrócono uwagę na coraz większe wymagania i obciążenia, jakim podlega olej silnikowy w nowoczesnych silnikach ciągników rolniczych. W silnikach spalinowych lepkość decyduje o stopniu uszczelnienia tłoka w cylindrze, skuteczności chłodzenia silnika oraz o możliwości uruchomienia zimnego silnika. Badania polegały na określeniu lepkości próbek olejów mineralnych i syntetycznych pobranych z silników ciągników o zbliżonych przebiegach. Wszystkie próbki pochodziły z turbodoładowanych silników o zapłonie samoczynnym serwisowanych w autoryzowanych stacjach obsługi pojazdów. Przeprowadzone badania wskazują na konieczność bieżącego monitorowania stanu lepkościowego olejów.

Słowa kluczowe: oleje silnikowe, lepkość dynamiczna, lepkość kinematyczna, przyczyny zanieczyszczenia oleju, monitorowanie oleju

Wstęp

Podczas eksploatacji ciągników olej silnikowy podlega procesowi starzenia, zmieniają się jego parametry fizykochemiczne i pojawiają zanieczyszczenia. Ich zawartość w oleju silnikowym ciągników rolniczych wzrasta wraz z przebiegiem i czasem użytkowania [4, 9]. Gdy warunki pracy są wyjątkowo niekorzystne, np. na drogach piaszczystych, polach i w terenie, silnik pracuje w dużym zapyleniu. Do silnika dostaje się gruby pył, który przyspiesza zużycie jego elementów wewnętrznych, np. pierścieni tłokowych, gładzi cylindrów [9]. Zimą, kiedy silnik pracuje w niskich temperaturach, powstają produkty spalania, których część trafia do skrzyni korbowej i rozcieńcza znajdujący się tam olej. W zależności od klasy lepkościowej oleju silnikowego, już 10-15% zawartości paliwa powoduje jego rozcieńczenie do wartości krytycznej z punktu widzenia funkcji smarowania (mierzona w temp. 100°C lepkość kinematyczna poniżej ok. $6 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), co prowadzi do zerwania filmu smarowego, wystąpienia tarcia granicznego, a nawet suchego, zamiast płynnego lub co najmniej półpłynnego, powodując uszkodzenie, a następnie zniszczenie warstwy ślizgowej panewek głównych i korbowodowych, zacieranie czopów w panewkach [7, 11].

Dążenie do coraz większej mocy ciągników rolniczych, ich wydajności, obniżenia zużycia paliwa i zmniejszenia jego toksyczności powoduje wielokierunkową degradację olejów silnikowych wyrażaną wskaźnikiem tzw. stresu olejowego [2].

Warunki pracy olejów - zmiany parametrów lepkościowych

Lepkość oleju wpływa zasadniczo na wyniki eksploatacyjne silnika, w tym na jednostkowe zużycie paliwa oraz na zużycie współpracujących części. Jeśli jest zbyt mała, może nastąpić zatarcie. Przy zbyt dużej lepkości oleju jego dopływ do odległych miejsc smarowania może być przerwany, skutkiem czego nastąpi zatarcie oraz strata mocy silnika z powodu zwiększonych oporów tarcia wewnętrznego, gdyż zgodnie z hydrodynamiczną teorią smarowania, współczynnik tarcia wewnętrznego oleju jest wprost proporcjonalny do jego lepkości.

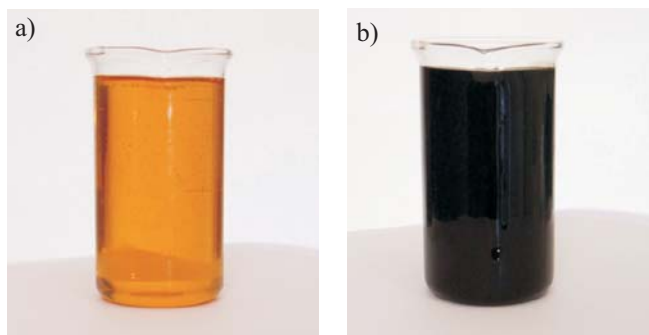
Wzrost lepkości oleju spowodowany jest wzrastającą ilością zanieczyszczeń, gromadzących się w nim w miarę upływu czasu. Tłumaczy się to tym, że olej zanieczyszczony uważany jest za mieszaninę dyspersyjną, tzn. mieszaninę cząstek stałych zawieszonych w cieczy. Parametry lepkości w danej temperaturze oraz rodzaj oleju wciąż są głównymi wyznacznikami, na jakie powinno się zwracać uwagę przy doborze oleju silnikowego - określa je każdy producent silnika w instrukcji obsługi.

Do czynników sprzyjających przyspieszonej, wielokierunkowej degradacji olejów silnikowych należą:

- nowoczesne, skomplikowane konstrukcje silników,
- zaawansowane systemy oczyszczania spalin,
- nowe materiały konstrukcyjne,
- zwiększające się obciążenia termiczne i mechaniczne elementów silników,
- wprowadzenie nowych paliw, w tym biopaliw,
- skomplikowane układy smarowania,
- zmiany w technologii wytwarzania olejów,
- wydłużenie przebiegów pomiędzy wymianami olejów [6].

Na rys. 1 przedstawiono olej świeży oraz przepracowany, który zmienia kolor i właściwości. W silnikach o zapłonie samoczynnym, którego spaliny zawierają dużo cząstek stałych, składających się z węgla, olej zmienia szybko barwę na czarną. W silniku o zapłonie iskrowym, którego spaliny zawierają mniej cząstek stałych o mniejszej średnicy, olej ciemnieje wolniej. Najwolniej, prawie niezauważalnie, zmienia się kolor oleju silników zasilanych gazem, gdyż spaliny zawierają minimalną ilość cząstek stałych. Eksploatowany w silniku olej narażony jest głównie na wysokie temperatury i obciążenia mechaniczne, kontakt z powstającymi produktami spalania oraz może być rozcieńczany paliwem. Sprzyja to zachodzącym procesom starzenia chemicznego oleju oraz jego zanieczyszczeniu. Degradacja oleju może też być spowodowana interakcjami pomiędzy składnikami oleju i paliwa. Lepkość jest ważną, ale tylko jedną z właściwości fizykochemicznych charakteryzujących potencjał eksploatacyjny oleju. Wskutek zachodzących procesów starzenia chemicznego, prowadzącego do powstawania żeli, szlamów i struktur polimerowych może się ona zwiększać, natomiast w wyniku rozcieńczenia paliwem - zmniejszać. Zmniejszenie lepkości może prowadzić

do zerwania filmu smarowego i pogorszenia właściwości smarnych. Z kolei zwiększenie lepkości może być przyczyną zwiększenia oporów ruchu silnika i utrudnienia rozruchu silnika w niskich temperaturach.



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 1. Zlewki zawierające świeży (a) oraz przepracowany olej (b)
Fig. 1. Beakers containing fresh (a) and overworked oil (b)

Stopniowa degradacja oleju silnikowego wiąże się ze zmianą jego właściwości fizykochemicznych, co z kolei rzutuje na wzrost zanieczyszczeń niektórych elementów silnika jego produktami oraz obecnością pierwiastków metali pochodzących z silnika.

Czynniki eksploatacyjne powodujące degradację olejów:

- **Zanieczyszczenia zewnętrzne:** są to zanieczyszczenia mogące przedostawać się do silnika z zewnątrz, np. krzem pochodzący z eksploatacji ciągników w warunkach dużego zapylenia.

- **Zanieczyszczenia pochodzące z procesów spalania:** są przyczyną większości uszkodzeń. W silnikach wysoko- i średnioobrotowych głównym składnikiem jest zazwyczaj sadza. Jej obecność spowodowana jest obniżoną wydajnością spalania. Sadza przyspiesza zużycie silnika, zwłaszcza w silnikach wykorzystujących technologię recykulacji spalin.

Awaryjne czynniki degradacji olejów:

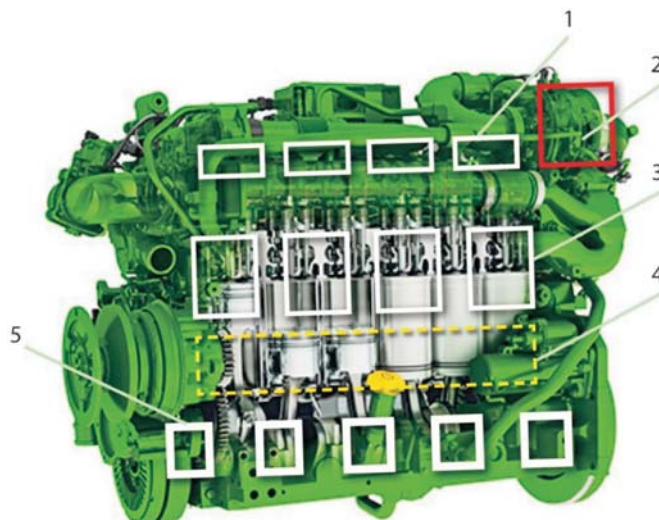
- **Płyn chłodzący:** jedno z najbardziej destrukcyjnych zanieczyszczeń w oleju silnikowym. Może on zwiększyć lepkość oleju lub doprowadzić do innych problemów, takich jak korozja w układzie i zatykanie filtrów.

- **Rozcieńczenie paliwem:** prowadzi do zmniejszenia lepkości, zwiększenia lotności, osłabienia właściwości myjących, korozji i innych.

Zanieczyszczenia stałe w oleju i możliwe przyczyny ich występowania

Wszystkie silniki mają jedną wspólną cechę: ich olej silnikowy zawiera wiele cennych informacji na temat samego oleju, jak również stanu silnika. Na przykład, mikroskopijne cząsteczki zawieszony w oleju dostarczają informacji na temat zużycia odpowiadających im części lub podzespołów [3, 7, 8]. Podwyższona zawartość pierwiastków metalicznych (głównie żelaza i pierwiastków, które stanowią dodatki do jego stopów - stali i żeliwa - może świadczyć o zużywaniu się metalowych elementów silnika (gładzi cylindrowych, pierścieni tłokowych, czopów wału korbowego, rozrządu czy też jego krzywek). Z kolei podwyższona zawartość metali kolorowych może wynikać z postępującego zużycia stopów łożyskowych, którymi pokrywa się panewki łożysk ślizgowych. Źródła i obszary pochodzenia zanieczyszczeń w oleju oraz przyczyny przedstawiono na rys. 2 oraz w tab. 1. Dysponując doświadczeniem oraz znając dopuszczalne zawartości poszczególnych pierwiastków wynikające ze składu chemicznego oleju można z dużym wyprzedzeniem określić, który węzeł tarcia w silniku podlega

nadmiernemu zużyciu. Dzięki temu można szybko zareagować na niekorzystne zjawiska zachodzące w silniku zanim nastąpi jego uszkodzenie czy poważniejsza awaria.



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 2. Możliwe źródła pochodzenia i możliwe przyczyny zmian zawartości pierwiastków zużyciowych w smarowym oleju silnikowym: 1- obszar zaworów, 2- obszar turbodoładowania, 3- obszar cylindrów, 4- obszar wału rozrządu po stronie przeciwnej niż wał korbowy, 5- obszar łożysk wału korbowego

Fig. 2. Possible origins of wear elements in the lubricating engine oil: 1- valve area, 2- turbocharging area, 3- cylinder area, 4- camshaft area on the opposite side to the shaft crank, 5- crankshaft bearing area

Tab. 1. Obszary pochodzenia zanieczyszczeń stałych w oleju i ich przyczyny

Table 1. Areas of origin of solid impurities in oil and their causes

Obszary pochodzenia zanieczyszczeń	Zanieczyszczenia stałe w oleju	Możliwe przyczyny
Obszar I zawory	molibden, kobalt, chrom, wolfram	nienormalna praca oleju silnikowego, przerywanie filmu olejowego
Obszar II turbodoładowanie	kobalt, wanad, krzem	stałe zanieczyszczenia w oleju silnikowym, degradacja oleju smarowego
Obszar III cylindry	aluminium, molibden, nikiel	zawartość paliwa lub płynu chłodzącego w oleju
Obszar IV wał rozrządu	żelazo, molibden, mangan	degradacja oleju silnikowego, niedostateczne smarowanie, korozja
Obszar V wał korbowy łożyska	żelazo, mangan, woda, fosfor, krzem, miedź, ołów, cyna	spadek ciśnienia oleju silnikowego, rozcieńczenie oleju silnikowego paliwem, wodą lub płynem chłodniczym

Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Materiał i metody badań

Materiał badawczy stanowiły próbki olejów silnikowych (klasa lepkości SAE 15W40) pozyskanych najczęściej w trakcie technicznej obsługi wymiany oleju smarowego silników ciągników rolniczych o zbliżonych mocach i przebiegach, które podlegały wymianie w terminach zalecanych przez producenta. Pobrano olej w ilościach 100 ml w stanie ciepłym i wymieszanym. Badania zostały wykonane w 3 powtórzeniach biegu badawczego dla każdego z olejów, a otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej. W celu dokładnej analizy zmian lepkości próbki badano w temp. co 20°C wg metodyki podanej w normie PN-EN ISO 3104 za pomocą lepkości-

mierza kapilarnego Ostwalda-Pinkevitcha i wraz z obliczonymi wartościami zostały przedstawione w postaci wykresów. W tab. 2 zestawiono wybrane oleje oraz czasokresy ich wymiany.

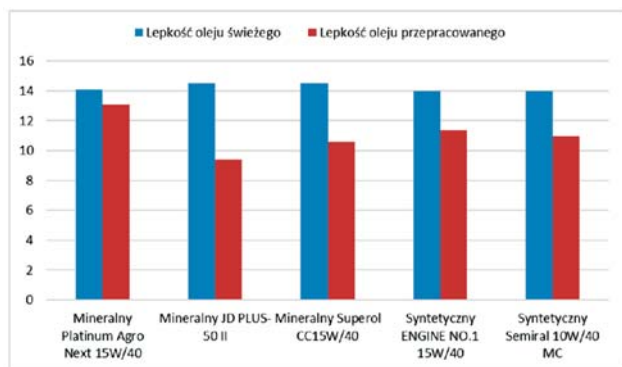
Tab. 2. Okresy wymiany oleju - analizy i parametry lepkościowe po pomiarach

Table 2. Oil change intervals - analysis and viscosity parameters after measurements

Marka ciągnika	Typ oleju Nazwa oleju	Czas pracy oleju [godz./mth ¹]	Lepkość kinematyczna [mm ² ·s ⁻¹] w temp. 100°C		
			Oleju świeżego	Oleju przeprac.	Względna zmiana w [%]
New Holland T5	Mineralny Platinum Agro Next 15W/40	300	(14,1)	13,07	-7,3
John Deere 6150 R	Mineralny JD PLUS-50 II	500	(14,5)	9,40	-35,18
Zetor 5320	Mineralny Superol CC15W/40	240	(14,5)	10,61	-26,8
Steयर 6150 CVT	Syntetyczny ENGINE NO.1 15W/40	300*/	(14)	11,37	-18,8
Massey Ferguson 3600	Syntetyczny Semiral 10W/40 MC	300*/	(14)	10,98	-21,6

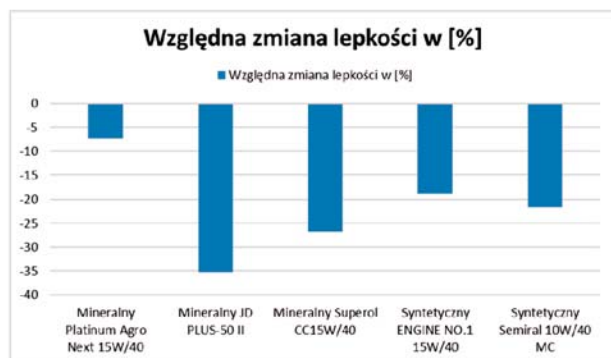
Znak „+” lub „-” oznacza odpowiednio przyrost lub spadek lepkości w stosunku do lepkości oleju świeżego

Źródło: opracowanie własne / Source: own study



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 3. Porównanie wyników testów olejów
Fig. 3. Comparison of oil test results



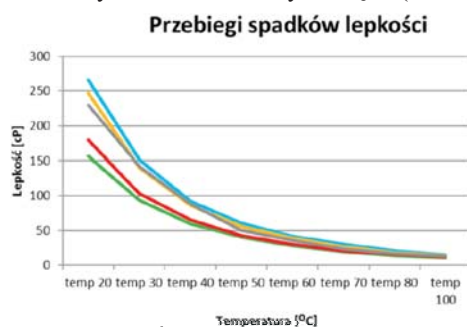
Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 4. Porównanie względnego spadku lepkości olejów
Fig. 4. Comparison of the relative decrease in oil viscosity

Prezentacja i analiza wyników badań

W analizie olejów przepracowanych wartość uzyskanej lepkości porównano z wartością dla oleju świeżego w celu określenia czy nastąpiło nadmierne rozcieńczenie lub zate-

żenie. Z bardzo dużym przybliżeniem stwierdzić można, że lepkość oleju w temperaturze 100°C odpowiada średniej lepkości oleju w trakcie normalnej eksploatacji. Za celowe wydaje się przyjęcie kryterium porównawczego stosownie do badań opisanych w literaturze przedmiotu i specyfikacji producentów olejów, tzn. względne dopuszczalne zmiany lepkości $\pm 25\%$ w stosunku do oleju świeżego. Obliczono również lepkość kinematyczną oleju jako stosunek jego lepkości dynamicznej do gęstości mierzonej w tej samej temperaturze. Wyniki przedstawiono w tab. 2 porównując je z wartościami oleju świeżego oraz na rys. 3 i 4. Dla eksploatowanych olejów lepkość kinematyczna (w temperaturze 100°C) przekroczyła wyraźnie wartość graniczną, czyli spadku o 25% w 2 badanych próbkach [1, 10, 12]. Z punktu widzenia lepkości kinematycznej olej mógł być dalej eksploatowany - dotyczy to próbki nr 1. Zgodnie z przedstawionymi wynikami za uzasadnione należy uznać wymianę olejów smarowych, które w tab. 2 stanowią pozostałe oleje. Analizując wykres (rys. 4) można stwierdzić, że krzywe dla poszczególnych próbek nr 1, 4 i 5 mają bardzo podobny przebieg i kształt. Zatem i procentowe zmiany lepkości są podobne. Natomiast w przypadku próbek nr 2 i 3 ich przebiegi odbiegają od pozostałych. Zauważalne są spadki lepkości już przy niższych temperaturach. Podczas eksploatacji pojazdu lepkość zmienia się w porównaniu z lepkością oleju świeżego - może maleć lub wzrastać. Podkreślić tu należy, że w większości próbek lepkość oleju spadła, co może świadczyć o tym, że w czasie eksploatacji nastąpiła degradacja struktury chemicznej węglowodorów (skrócenie długości łańcuchów), prawdopodobnie w wyniku mechanicznego oddziaływania smarowanych części (tzw. węzłów tarcia).



Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Rys. 5. Zmiany lepkości dynamicznej próbek oleju w zależności od temperatury
Fig. 5. Changes in the dynamic viscosity of oil samples depending on the temperature

W tab. 3 zestawiono wartości liczbowe lepkości dynamicznej wyznaczone dla pięciu próbek oleju.

Tab. 3. Wartości numeryczne lepkości dynamicznej wyznaczone dla 5 próbek oleju

Table 3. Numerical values of dynamic viscosity determined for 5 oil samples

Przebiegi spadków lepkości Temperatura [°C]	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5
20	265,6	156,8	179,84	247,36	230,1
30	152	93,44	103,68	140,8	142,3
40	91,84	59,94	65,28	86,4	87,9
50	60,48	40,64	42,56	55,68	49,8
60	41,92	27,84	29,76	38,4	35,5
70	29,76	20,16	20,48	26,56	23,7
80	20,8	13,76	16	18,24	16,9
100	14,8	10,7	12	13,68	12,8

Źródło: opracowanie własne / Source: own study

Ocena przydatności eksploatacyjnej oleju silnikowego

Monitorowanie parametrów oleju w czasie eksploatacji silnika może być bardzo pomocne przy ocenie stanu technicznego jednostki napędowej [5, 13]. Przydatność oleju silnikowego do dalszego użytkowania można ocenić badając tzw. przenikalność elektryczną próbki badanego oleju [3, 11]. W czasie eksploatacji oleju przenikalność elektryczna zmienia się pod wpływem czynników wynikających z procesu spalania. Do czynników zmieniających przenikalność elektryczną należy: wzrost ilości pęcherzyków powietrza, obecność osadów i szlamów różnego pochodzenia. Dla olejów mineralnych świeżych wynosi 2.5, a dla olejów syntetycznych 2.6. Do określenia przenikalności elektrycznej wykorzystuje się specjalne urządzenie, np. Lubri Sensor NI-2B (rys. 6).



Rys. 6. Urządzenie LUBRI SENSOR NI-2B do wyznaczenia przenikalności elektrycznej oleju silnikowego [14]

Fig. 6. LUBRI SENSOR NI-2B device for determination of electric permittivity of motor oil [14]

Najbardziej popularną grupą przyrządów służących do pomiaru lepkości są wiskozymetry rotacyjne. Dają one wiarygodne, dokładne, i co najważniejsze, powtarzalne wyniki. Służą do pomiarów różnych substancji o bardzo szerokim spektrum lepkości. Najbardziej znanym i renomowanym producentem wiskozymetrów rotacyjnych jest amerykańska firma Brookfield Engineering Laboratories, Inc. Autoryzowanym dystrybutorem w Polsce firmy Brookfield jest Labo Plus Sp. z o.o. [13].

Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono analizę opartą na porównaniu lepkości oleju silnikowego podczas eksploatacji, służącą

do oceny jego stanu. Na podstawie przeprowadzonej analizy wydaje się zasadne w niektórych przypadkach, w warunkach trudnej eksploatacji ciągników w rolnictwie przebieg /interwał/ ten należy skrócić, co zwiększa nieco nakłady na obsługę, lecz na pewno podniesie to sprawność eksploatacyjną, ponieważ jednostka napędowa smarowana z pewnością nie ulegnie przedczesnemu zużyciu czy wręcz awarii. Występują również przypadki gdzie stan jakościowy oleju jest na tyle dobry, że można okresy wymiany oleju wydłużyć, co oznacza zmniejszenie kosztów samego oleju i filtrów, jak również koszty związane z czasowym wyłączeniem ciągnika z eksploatacji a więc ograniczenie kosztów związanych z pracochłonnością i materiałochłonnością. Reasumując zalecenia producentów co do terminu wymiany olejów smarowych niekoniecznie odpowiadają rzeczywistemu stanowi jakościowemu oleju silnikowego. Uzasadnia to poszukiwanie rozwiązań do bieżącego monitorowania stanów jakościowych olejów.

Bibliografia

- [1] Bocheński C.I.: Paliwa i oleje smarujące w rolnictwie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2005.
- [2] Budzik G., Jakubiec J.: Czynniki mające wpływ na stopień degradacji oleju silnikowego w okresie eksploatacji. Instytut Nafty i Gazu Kraków, 2012.
- [3] Faber J., Brodzik K., Szary J.: Badanie składu pierwiastkowego paliw i biopaliw. Technika Transportu Szynowego, 2015, 12.
- [4] Gomółka L., Augustynowicz A., Maciąg A.: Analiza stopnia degradacji oleju smarującego w silnikach spalinowych. PTNSS-2011-SC-008.
- [5] Idzior M., Wichtowska K.: Badanie wpływu przebiegu pojazdów na zmianę właściwości olejów silnikowych. Autobusy - Testy 2016, 6.
- [6] Jóska M., Kołodziejczyk D.: Wybrane problemy eksploatacyjne pojazdów i maszyn rolniczych w zakresie ich serwisowania. Journal of Rese-arch and Applications in Agricultural Engineering, 2008, Vol. 53, 2, 5-7.
- [7] Niewczas A., Wrona J., Wrona R.: Zanieczyszczenia oleju smarującego oraz ich wpływ na trwałość silnika spalinowego. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2010, 6.
- [8] Cedek Ł.: Skąd się biorą drobiny metalu w oleju silnikowym? Nowoczesny Warsztat, Tczew, 2017, 6.
- [9] Skrobicki A., Ekielski A.: Pojazdy i ciągniki rolnicze. Warszawa, 2012, 34-80.
- [10] Stawicki T., Sędlak P., Grieger A.: Zmiany lepkości olejów smarowych zachodzące w procesie użytkowania silników ciągników rolniczych. Autobusy - Testy, 2016, 6.
- [11] Urzędowska W., Stępień Z.: Wybrane zagadnienia dotyczące zmian właściwości silnikowego oleju smarowego w eksploatacji. Instytut Nafty i Gazu, Kraków, 2012, 12.
- [12] Wachal A.: Starzenie i racjonalne czasy pracy olejów smarowych. Materiały konferencji szkoleniowej Podkomitetu Tribologii NOT Warszawa, 1983.
- [13] Wróblewski P., Kupiec J.: Diagnostowanie podzespołów i zespołów pojazdów samochodowych. WKiŁ Warszawa, 2015.
- [14] Materiały firmowe Northern Technologies International Corp.
- [15] Materiały firmowe Brookfield Labo Plus Sp. z o.o.

Źródło finansowania: badania własne

CHANGES IN THE VISCOSITY OF ENGINE OILS IN AGRICULTURAL TRACTORS

Summary

The article discusses important issues regarding changes in dynamic viscosity and kinematic viscosity of engine oils during the operation of agricultural vehicles, their monitoring and tools used for this purpose. Attention has been paid to the increasing requirements and loads of lubricating oil in modern engines of agricultural tractors. In combustion engines, viscosity determines the degree of piston sealing in the cylinder, the efficiency of engine cooling and the possibility and start-up of a non-heated engine. The tests consisted in determining the viscosity of mineral and synthetic oils collected from tractor engines with similar mileages. All samples came from turbocharged, self-ignition engines serviced at authorized service stations. The conducted research indicates the necessity of ongoing monitoring of the viscosity status of oils.

Key words: engine oils, dynamic viscosity, kinematic, oil contaminants and their causes, oil monitoring