

## CHOLESTERINIŲ SKYSTŪJŲ KRISTALŲ ĮTAKA MINERALINĖS VARIKLINĖS ALYVOS TRIBOLOGINĖMS CHARAKTERISTIKOMS

V. Vekteris, V. Mokšin

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

### 1. Įvadas

Šiuolaikiniai tyrimai [1–4] teigia, kad mažas trinties koeficientas gaunamas tada, kai kontaktuojančių paviršių paviršiniuose sluoksniuose atsiranda teigiamas savybių gradientas. Tai vyksta veikiant aktyviojo paviršiaus medžiagoms, kontaktuojančius paviršius padengiant plastiškų metalų sluoksniais, priedams chemiškai reaguojant su trinties paviršiaus medžiagomis arba esant tepimo skysčio molekulių struktūravimui. Tokiu atveju skystieji kristalai yra įdomūs tribologijai tuo, kad jie pasižymi skysčio takumu ir kietojo kristalinio kūno tamprumu. Tačiau skystųjų kristalų tribologinių savybių tyrimams skirta labai nedaug mokslinių darbų. Taip yra, matyt, todėl, kad dauguma skystųjų kristalų kambario temperatūroje yra kietosios fazės, o tai neleidžia jų naudoti kaip tepimo skystį. Taip pat didelė skystųjų kristalų kaina riboja jų panaudojimą kaip tepimo medžiagą. Todėl tikslingiau skystuosius kristalus naudoti kaip priedus prie tepalų. Žinios apie tokių mišinių tribologines savybes pradėtos kaupti neseniai, kaip rodo publikacijos [1–4]. Visi autoriai registruoja trinties koeficiento sumažėjimą, skystuosius kristalus naudojant įvairioms alyvoms. Tam tikrais atvejais, naudojant cholesterolinius skystuosius kristalus, trinties koeficientas mažėja 5, o dilimo rodiklis 20 ir daugiau kartų [1–3]. Tačiau dauguma tokių tyrimų buvo atlikta su nepolinėmis alyvomis (vazelino ir t.t.), kai mišinio temperatūros viršijo skystųjų kristalų lydymosi temperatūrą. Kadangi tokių mišinių tribologinės savybės labai priklauso nuo skystųjų kristalų lydymosi ir skaidrėjimo temperatūros, negalima padaryti galutinės išvados apie skystųjų kristalų, kaip priedų prie alyvų, tribologinį efektyvumą. Taip pat nustatyta, kad tokių mišinių tribologinės savybės priklauso nuo jų tirpumo alyvoje. Pastebėta, kad skystųjų kristalų tirpumo alyvoje sumažėjimas atitinka didesnę trin-

ties koeficientą ir dilimo rodiklį (esant žemesnei mišinio temperatūrai negu skystųjų kristalų lydymosi temperatūra) [1].

Variklinėse alyvose, kaip žinoma, yra aktyviojo paviršiaus medžiagų, kurios didina suvilgimo energiją. Todėl galima tikėtis, kad skystieji kristalai geriau ištirps joje negu nepolinėje alyvoje. Taip pat svarbu nustatyti skystųjų kristalų tribologinį efektyvumą, kai mišinio temperatūra neviršija skystųjų kristalų lydymosi temperatūros, mišinio savybes ir kt.

Šio darbo tikslas – nustatyti cholesterolinių skystųjų kristalų molekulinės masės įtaką trinties koeficiento dydžiui, esant fiksuotai jų koncentracijai mineralinėje variklinėje alyvoje žemesnėje mišinio temperatūroje negu skystųjų kristalų lydymosi temperatūra, ir savybes, kurių reikia toliau pateiktam matematiniam uždaviniui spręsti ir praktiniam pritaikymui.

### 2. Matematinis uždavinio formulavimas

Variklinėse alyvose naudojant skystuosius kristalus, kurie formuoja pasienio sluoksnį, gautą tirpalą galima nagrinėti kaip daugiakomponentį skystį, kurią vadinysime mišiniu. Tuomet judesio kiekio lygtis bus tokia [5]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial (\nabla^2 \psi)}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial (\nabla^2 \psi)}{\partial y} = \nu \nabla^2 \nabla^2 \psi, \quad (1)$$

$\psi$  – tėkmės funkcija;  $\nabla$  – operatorius;  $\nu$  – kinematinė klampa;  $x, y$  – koordinatės.

Šiuo atveju laikome, kad ašine kryptimi tekėjimo nėra ir (1) lygtis užrašyta tik sukimosi ir normalės kryptimi. Pasienio sluoksnio energijos lygtis mišiniui atrodys taip:

$$\begin{aligned}
\rho \left( \frac{\partial h_x}{\partial t} + u \frac{\partial h_x}{\partial x} + V \frac{\partial h_x}{\partial y} \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \sum_{i,j} \frac{\partial}{\partial y} \times \\
\left[ \frac{\rho m_i}{m^2} D_{ij} h_i \frac{\partial}{\partial y} (C_j m) \right] &- \sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{m_i (m - m_j)}{m^2} \times \right. \right. \\
C_j \rho D_{ij} h_x \frac{\partial}{\partial y} \ln p \Big] &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{m_i (m - m_j)}{m^2} C_j \rho D_{ij} \times \right. \\
h_i \frac{\partial}{\partial y} \ln p \Big] &+ \sum_{i,j} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{m_i m_j}{m} C_j \rho D_{i,j} \frac{h_i}{RT} \times \right. \\
\left[ F_{xj} - \sum_k (C_k F_{yk}) \right] &\Big\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ m_i \frac{m_j}{m} C_j \rho D_{ij} \times \right. \\
\frac{h_i}{RT} \left[ F_{yj} - \sum_k (C_k F_{yk}) \right] &\Big\} + \sum_i \frac{\partial}{\partial y} (h_i D_i^T \frac{\partial}{\partial y} \ln T) - \\
\sum_{i,j,k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{C_j}{m_i m_j m} RT \frac{D_i^T}{D_{ij}} \left( D_{ik} \frac{m_j}{D_j} - D_{jk} \frac{m_j}{C_j} \right) \right] \times \right. & \\
\left. [C_k (m - m_k) \frac{\partial}{\partial x} \ln p - \frac{C_k m_k m}{RT} (F_{yk} - \right. & \\
\left. \sum_l C_l F_{xl}) \right] \Big\} &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{C_j}{m_j m_i m} RT \frac{D_i^T}{D_{ij}} \left( D_{ik} \frac{m_i}{C_i} - \right. \right. \\
\left. D_{jk} \frac{m_j}{C_j} \right) \Big\} &\left[ \frac{\partial}{\partial y} (C_k m) + C_k (m - m_k) \frac{\partial}{\partial y} \ln p - \right. \\
\left. \frac{C_k m_k m}{RT} (F_{yk} - \sum_l C_l F_{yl}) \right] &\Big\} + \sum_{i,j} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{C_j}{m_i m_j} \times \right. \\
\left. \frac{RT}{\rho} \frac{D_i^T}{D_{ij}} \left( \frac{D_i^T}{C_i} - \frac{D_j^T}{C_j} \right) \frac{\partial}{\partial y} \ln T \right] &+ \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + \\
\mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 &+ \frac{\rho}{m^2} \sum_{i,j} m_i D_{ij} \left\{ F_{xi} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (C_j m) + C_j \times \right. \right. \\
(m - m_j) \frac{\partial}{\partial x} \ln p - \frac{C_j m_j m}{RT} &\left. \left[ F_{xj} - \sum_k (C_k F_{xk}) \right] \right\} + \\
F_{yi} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (C_i m) + C_j (m - m_j) \frac{\partial}{\partial y} \ln p - \frac{C_j m_j m}{RT} \times \right. & \\
\left. \left[ F_{yj} - \sum_k (C_k F_{yk}) \right] \right\} &\Big\} - \sum_i D_i^T \left[ F_{xi} \frac{\partial}{\partial x} \ln T + \right. \\
\left. F_{yi} \frac{\partial}{\partial y} \ln T \right], & \quad (2)
\end{aligned}$$

$\rho$  – mišinio tankis;  $h_x$  – entalpija, įvertinanti cheminio virsmo energiją ir fazių pasikeitimą;  $D_{ij}$  – difuzijos koeficientas;  $D^T$  – termodifuzijos koeficientas;  $m$  – molekulinė masė;  $C$  – dujų masės kiekis mišinyje;  $R$  – dujų pastovioji;  $T$  – temperatūra;  $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas;  $i, j, k, l$  – indeksai, rodantys mišinio komponentų numerį;  $\mathbf{F}$  – jėgos vektorius, veikiantis į medžiagos masės vienetą;  $x, y$  – koordinatės;  $\mu$  – dinaminė klampa;  $t$  – laikas;  $u$  – greitis pagal  $x$

koordinatę;  $V$  – greitis pagal  $y$  koordinatę;  $p$  – slėgis.

Susidariusio pasienio sluoksnio difuzijos lygtį bendruoju pavidalu galima pateikti taip:

$$\begin{aligned}
\rho \left( \frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) &= - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho \frac{m_i}{m^2} \sum_j \left[ D_{ij} \frac{\partial}{\partial y} \times \right. \right. \\
(C_j m) \Big] &- \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho m_i}{m^2} \sum_j \left[ D_{ij} C_j (m - m_j) \frac{\partial}{\partial x} \ln p \right] \right\} - \\
\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\rho m_i}{m^2} \sum_j \left[ D_{ij} C_j (m - m_j) \frac{\partial}{\partial y} \ln p \right] \right\} &+ \frac{\partial}{\partial x} \times \\
\left\{ \frac{\rho m_i}{m^2} \sum_j \left[ D_{ij} \frac{C_j m_j m}{RT} \left[ F_{xj} - \sum_k (C_k F_{xk}) \right] \right] \right\} &+ \\
\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\rho m_i}{m^2} \sum_j \left[ D_{ij} \frac{C_j m_j m}{RT} \left[ F_{yj} - \sum_k (C_k F_{yk}) \right] \right] \right\} &+ \\
\frac{\partial}{\partial y} \left( D_i^T \frac{\partial}{\partial y} \ln T \right) &+ W_i, \quad (3)
\end{aligned}$$

$W_i$  – mišinio  $i$ -ojo komponento medžiagos kiekis.

Pakankamai tiksli  $i$ -ojo cheminio komponento mišinyje išsaugojimo lygtis bus tokia:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x} \left( m_i \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( m_i \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( D_i \rho \frac{\partial m_i}{\partial x} \right) - \\
\frac{\partial}{\partial y} \left( D_i \rho \frac{\partial m_i}{\partial y} \right) - W_i = 0. \quad (4)
\end{aligned}$$

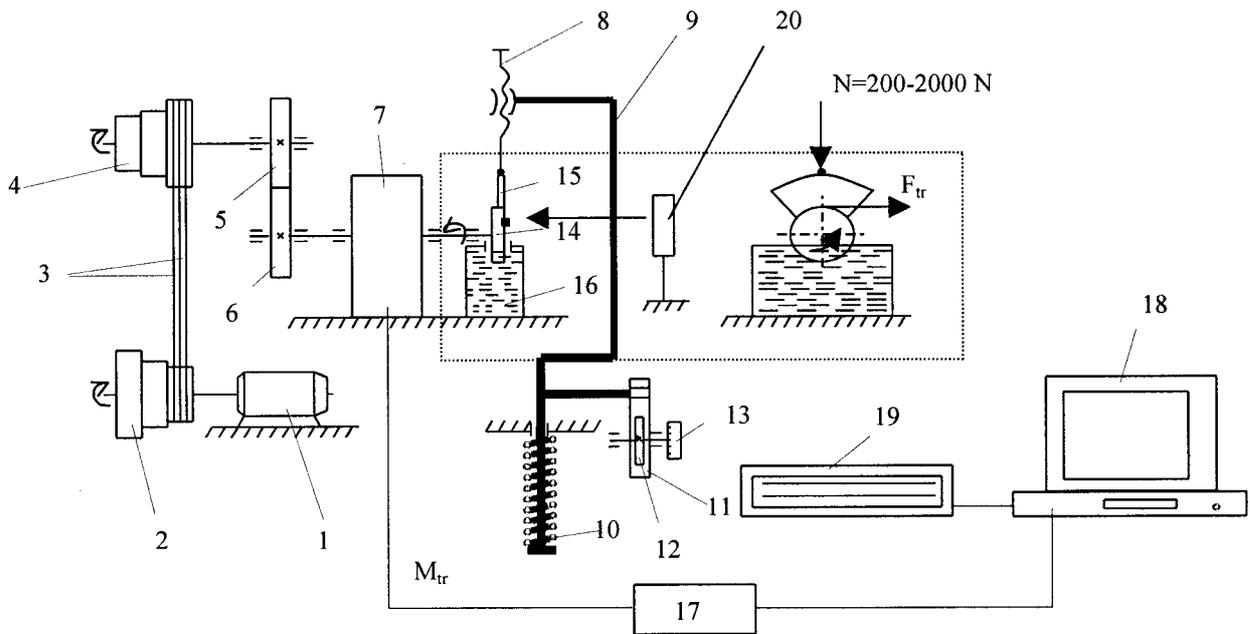
Gauta lygčių sistema (1–4) charakterizuoja mišinio (tepalo su skystųjų kristalų priedais) dvimatį tekėjimą. Lygties (3) dešinioji pusė nusako komponento srautą į mažesnės koncentracijos pusę, molekulių pasislinkimo tendenciją – lengvesnių į mažesnio slėgio pusę, o sunkių – į didesnio slėgio pusę, taip pat dinaminę difuziją, atsirandančią veikiant jėgoms į mišinio daleles, bei termodifuziją, kuriai esant sunkesnės molekulės dažniausiai pasislenka į žemų temperatūrų pusę ir atvirkščiai, paskutinis lygties narys charakterizuoja medžiagos šaltinį, susijusį su cheminėmis reakcijomis.

Skaitmeniniam lygčių (1–4) sprendimui reikia nustatyti sukurto mišinio savybes. Tam tikslui atliksime eksperimentinius tyrimus.

### 3. Eksperimentiniai tyrimai

#### 3.1. Tyrimo standas

Bandymams buvo naudotas kompiuterizuotas tribometras, kurio pagrindas yra trinties mašina CMIĮ-2. Buvo pasirinkta schema „besisukantis diskas – nejudanti trinkelė“. Tribometro schema parodyta 1 paveiksle.



**1 pav.** Kompiuterizuoto tribometro principinė schema: 1 – elektros variklis; 2, 4 – laiptuoti skriemuliai; 3 – diržai; 5, 6, 12 – krumpliaraičiai; 7 – induktyvinis keitiklis; 8 – apkrovimo sraigtas; 9 – svirtis; 10 – apkrovimo spyruoklė; 11 – krumpliaštiebis; 13 – limbas; 14 – apatinis bandinys (diskas); 15 – trinkelė; 16 – vonelė su tiriamąja alyva; 17 – stiprinimo ir „0“ nustatymo blokas; 18 – kompiuteris; 19 – lazerinis spausdintuvas; 20 – stroboskopas

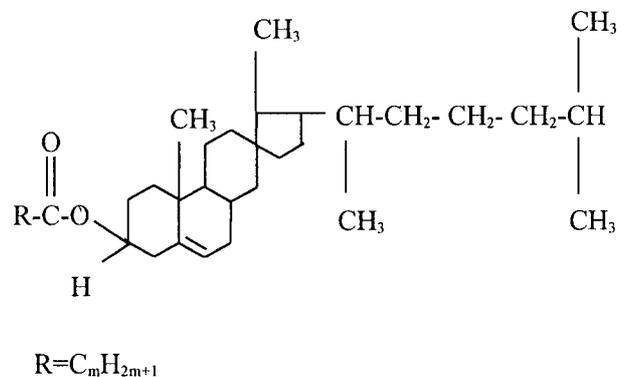
**Fig 1.** Scheme of the test stand: 1 – electromotor; 2, 4 – stepped pulleys; 3 – belts; 5, 6, 12 – gearwheels; 7 – induction sensor; 8 – loading screw; 9 – lever; 10 – loading spring; 11 – rack; 13 – dial; 14 – lower specimen (roller); 15 – block; 16 – capacity for test lubricants; 17 – block of amplification and „0“ position tuning; 18 – computer; 19 – laser printer; 20 – stroboscope

Sukimosi judesys apatiniam bandiniui (diskui) perduodamas nuo elektros variklio per trapecinio diržo parvarą ir tiesiakrumplius krumpliaraičius (5, 6). Disko sukčius galima keisti trapecinius diržus perkeltiant į atitinkamus laiptuotų skriemulių griovelius. Tribometras leidžia bandyti trinties poras, esant šiems nominaliems disko sukčiams:  $n_1=300\pm 30$  suk/min,  $n_2=500\pm 50$  suk/min,  $n_3=1000\pm 100$  suk/min. Tikrieji disko sukčiai matuojami Danijos firmos „Bruel and Kjaer“ stroboskopu 4913. Segmento formos trinkelė spaudžiama prie disko sukant apkrovimo sraigta. Sukant šį sraigta apkrovimo spyruoklė susispaudžia ir svirties judesys per tiesiakrumplį krumpliaštiebį ir krumpliaratį (12) perduodamas limbui, kurio skalė sugraduota santykiniais vienetais. Tikrasis apkrovimo jėgos dydis nustatomas iš apkrovimo mechanizmo kalibravimo grafiko. Trinties poros (14, 15) tepimas atliekamas diską panardinus į vonelę su tiriamąja alyva. Trinties momentui (disko veleno sukimo momentui) matuoti naudojamas induktyvinis keitiklis, kurio torsionas sujungtas su disko velenu. Elektrinis signalas nuo keitiklio matavimo ričių patenka į elektrinę palyginimo schemą, toliau per stiprinimo ir „0“ nustatymo bloką jis patenka į kompiuterio matavimo signalų įvesties ir išvesties plokštę. Plokštė užregistruoti ir sustiprinti signalai vaizduojami displejuje ir užrašomi į kompiuterio kietąjį diską. Po bandymo jie apdorojami programiniiais

paketais „Microsoft Excel“, „Microcal Origin“ arba kitais. Rezultatai spausdinami lazeriniu spausdintuvu.

### 3.2. Tyrimų metodika

Bandymams buvo paimta mineralinė variklinė alyva „Shell Helix SAE 10W/40“ (Suomija). Kaip priedai prie minėtosios alyvos buvo naudojama keturios rūšys cholesterinių skystųjų kristalų (cholesterino esteriai), kurių bendroji molekulinė formulė pateikta 2 paveiksle.



**2 pav.** Cholesterinių skystųjų kristalų molekulinė formulė  
**Fig 2.** The molecular formula of tested cholesteric liquid crystals

Skystieji kristalai	R	Lydimosi temperatūra $T_{lyd}$ , °C	Smektinės mezofazės egzistavimo temperatūrų diapazonas $T_{smekt}$ , °C	Perėjimo iš vienos mezofazės į kitą temperatūra $T_{per}$ , °C	Cholesterinės mezofazės egzistavimo temperatūrų diapazonas $T_{chol}$ , °C	Skaidrėjimo temperatūra $T_{skaid}$ , °C	Molekulinė masė, m
Valerijonų rūgšties cholesterino esteris	$C_4H_9$	93,0	-	-	93-101,5	101,5	470,79
Kaprono rūgšties cholesterino esteris	$C_5H_{11}$	99,5	-	-	99,5-101,5	101,5	484,81
Miristino rūgšties cholesterino esteris	$C_{13}H_{27}$	71,4	71,4-79,3	79,3	79,3-84,1	84,1	597,03
Stearino rūgšties cholesterino esteris	$C_{17}H_{35}$	83	-	-	(75,5-79,5)*	83	653,14

\* Mezofazė atsiranda tik aušinant lydalą

Cholesterinių skystųjų kristalų pavadinimai ir fizinės savybės pateiktos lentelėje. Buvo atlikti bandymai su trinties pora „besisukantis diskas – nejudanti trinkelė“, kuri dirbo ribinės trinties sąlygomis. Disko ir trinkelės medžiaga yra plienas 45. Abiejų bandinių paviršiaus šiurkštumas prieš bandant  $R_a=2,5$  mm. Disko sukiai buvo pastovūs –  $n=545$  suk/min ( $v=1,43$  m/s). Prieš kiekvieną bandymą bandiniai buvo išvalomi didelio dispersiškumo aktyviosios anglies dulkėmis. Po valymo anglies dulkės nuo bandinių pašalinamos stipria oro čiurkšle. Šis adsorbcinis metodas, sukurtas A. S. Achmatovo, leidžia nuo metalinių paviršių greitai ir gerai nuvalyti visus silpnai su jais surištus adsorbcinius sluoksnius ir plėveles. Tepimo skystis buvo ruošiamas taip: alyva (155 ml) buvo kaitinama iki temperatūros, aukštesnės už skystųjų kristalų lydymosi temperatūrą, vėliau į įkaitintą alyvą buvo pilami skystieji kristalai (2% kiekio) ir mišinys buvo ataušinamas iki kambario temperatūros.

Išvalius bandinius ir paruošus mišinį į vonelę buvo supilamas tepimo skystis, trinkelė apkraunama 1000 N apkrova, mašina paleidžiama ir tris minutes kompiuteryje buvo matuojamas ir registruojamas trinties momentas. Kiekvienas bandymas buvo kartojamas tris kartus, norint išvengti atsitiktinių paklaidų įtakos matavimo rezultatams. Bandymų trukmė iki trijų minučių buvo sumažinta dėl tokių priežasčių:

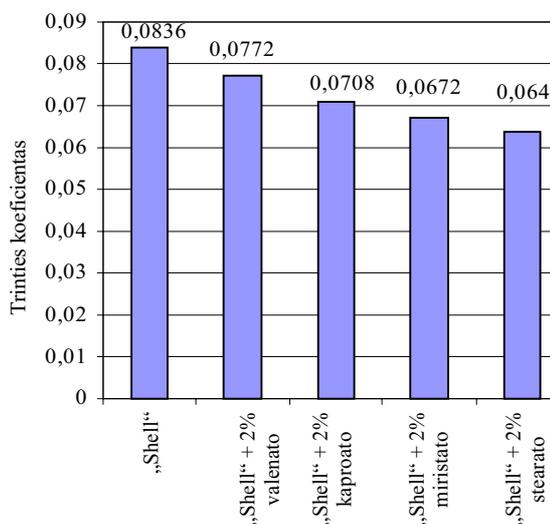
1) norėta išvengti kontaktuojančių paviršių frikcinio iššildymo ir dėl to atsirandančio trinties momento kitimo;

2) siekta išvengti alyvos ir alyvos su skystųjų kristalų priedais tribologinių savybių pasikeitimo dėl iššildymo;

3) norėta išvengti kontaktuojančių paviršių šiurkštumo pasikeitimo ir dėl to atsirandančio trinties momento nepastovumo.

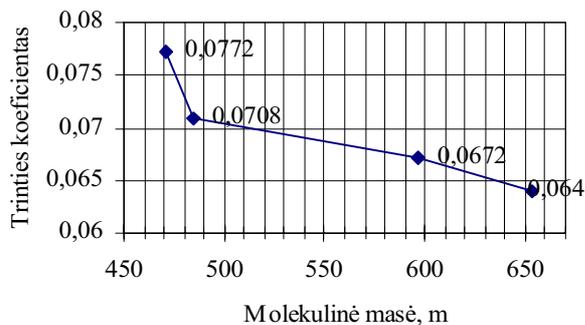
#### 4. Bandymų rezultatai

Visi skystieji kristalai visiškai ištirpo mineralinėje variklinėje alyvoje. Mišinius atšaldžius susidarė skaidrios sistemos be kristalų. Tai liudija apie tikrojo skystųjų kristalų tirpalo alyvoje susidarymą.



3 pav. Suvidurkinto trinties koeficiento priklausomybė nuo tepimo skysčio sudėties

Fig 3. Friction coefficient as function of lubricating compositions



4 pav. Trinties koeficiento priklausomybė nuo skystųjų kristalų molekulinės masės

Fig 4. Friction coefficient in dependence on liquid crystals molecular weight

3 paveiksle pateiktos suvidurkintos trinties koeficiento reikšmės išbandytiems tepimo skysčiams, o 4 paveiksle – trinties koeficiento priklausomybė nuo skystųjų kristalų molekulinės masės, kai jų koncentracija variklinėje alyvoje yra 2%.

## 5. Išvados

Visi skystieji kristalai turėjo įtakos mineralinės variklinės alyvos antifrikcinėms charakteristikoms, be to, naudojant stambiamolekulius skystuosius kristalus, trinties koeficientas sumažėjo iki 0,064, t. y. 1,3 karto mažiau, negu tepant trinties porą alyva be priedų, neatsižvelgiant į tai, kad bandymai buvo atlikti esant žemesnei tepimo mišinio temperatūrai negu skystųjų kristalų perėjimo temperatūra iš kietosios fazės į skystųjų kristalų fazę (tam tikslui temperatūra buvo matuojama voneleje ir visais atvejais ji neviršijo 40°C).

Tokio trinties koeficiento pasikeitimo priežastys yra nevisiškai aiškios, nes visi skystieji kristalai visai ištirpo alyvoje ir atsirado sistema iš alyvos ir skystųjų kristalų molekulių. Tačiau galima spėti, kad tokiai sistemai kontaktuojant su metaliniu paviršiumi, ant paviršiaus adsorbuosis ne tik alyvos molekulės, bet ir skystųjų kristalų molekulės. Greičiausiai skystųjų kristalų molekulės orientuosios savo ilgomis ašimis lygiagrečiai su alyvos molekulėmis, kurios paprastai orientuojasi statmenai atraminiam paviršiumi. Dėl savo anizotropijos ir didelių matmenų, skystųjų kristalų molekulės gali padidinti ribinio sluoksnio stiprumą.

Gauti tyrimo duomenys leis atlikti ir kai kuriuos skaitmeninius tyrimus pagal (1-4) lygčių sistemą.

## Literatūra

1. Б. И. Купчинов, В. Г. Родненков, С. Ф. Ермаков. Введение в трибологию жидких кристаллов. Гомель: ИММС АНБ Информтриб, 1993. 156 с.
2. Б. И. Купчинов, С. Ф. Ермаков, В. П. Паркалов // Трение и износ, Т. 8, №. 4, 1987, с. 614–619.
3. Б. И. Купчинов, В. Г. Родненков, В. П. Паркалов // Трение и износ, Т.10, №. 4, 1989, с. 592–598.
4. J. A. Tichy, Y. Rhin // Journal of tribology, Vol 111, No 1, 1989, p. 169–174.
5. V. Vekteris. Adaptive tribological systems. Theory and application. V.: Technika, 1996. 204 p.

Įteikta 2000 06 05

## INFLUENCE OF CHOLESTERIC LIQUID CRYSTALS ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF MINERAL MOTOR OIL

V. Vekteris, V. Mokšin

S u m m a r y

The results of the comparative tests of anti-friction properties of the mineral motor oil Shell Helix SAE 10W/40 with the cholesteric liquid crystals additives and without them are presented in this paper.

Tribological tests were realized in the system: roller-fixed block; tribological load was 1000N, friction velocity was 1,43 m/s. Specimens were made of 45 (0,45% C) steel. The specially prepared compositions (Shell Helix+ liquid crystals) contained 2% of the additives.

The test results are presented as the dependence of coefficient of friction versus molecular weight of liquid crystals.

## VLADAS VEKTERIS

Doctor habil, Professor, Member of STLE, Head of Department of Machine Building, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU, formerly VTU), J. Basanavičiaus g. 28, LT-2009 Vilnius, Lithuania. E- mail: mg@me.vtu.lt

First degree in Mechanical Engineering, Kaunas Polytechnic Institute (KPI, now KTU), 1966. Doctor of technical sciences, Moscow N. Bauman Technical University, 1974. Doctor habil of sciences, Moscow N. Bauman Technical University, 1989. Publications: author of more than 125 publications in various journals, author of 20 industrial patents and 4 books. Research interests: tribology.

## VADIM MOKŠIN

Doctoral student, assistant. Department of Machine Building, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU, formerly VTU), J. Basanavičiaus g. 28, LT-2009 Vilnius, Lithuania. E- mail: vadim@me.vtu.lt

Master of Technical Science (Mechanical Engineering) (1997). Research interests: tribology.