









DOI 10.51885/1561-4212\_2025\_4\_106

FTAXP 30.51.41

## МАЙЛАУ МАТЕРИАЛДАРЫНДАҒЫ ФУЛЛЕРЕНДЕР: И-20А МОТОР МАЙЫНЫҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ НАНОҚОСПАЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

### ФУЛЛЕРЕНҮ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ВЛИЯНИЕ НАНОДОБАВОК НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОТОРНОГО МАСЛА И-20А

### FULLERENES IN LUBRICANTS: IMPACT OF NANO-ADDITIVES ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF I-20A MOTOR OIL

Ж.Т. Накысбеков <sup>1,2\*</sup>, Д.В. Чернышев <sup>1,3</sup>, М.Б. Айтжанов <sup>1</sup>, Д.В. Исмаилов <sup>1,2</sup>,  
Г. Партизан <sup>1,4</sup>, Г.С. Суюндыкова <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

<sup>2</sup>«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

<sup>3</sup>Dragon Lakshme Group KZ, Алматы қ., Қазақстан

<sup>4</sup>«Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан

\*Жауапты автор: Накысбеков Жасулан, e-mail: Zhassulan.Nakysbekov@gmail.com

#### Түйінді сөздер:

мотор майы, фуллерен,  
наноқоспа, Тимкен  
сынағы, трибологиялық  
қасиеттер, тозуға  
төзімділік, көміртекті  
наноматериалдар,  
қорғаныш  
трибоқабқыша.

#### ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақала И-20А мотор майының трибологиялық қасиеттерін фуллерен қоспалары арқылы жақсартуға арналған. 536 г және 1072 г жүктемелерде тозу көлемінің өзгерістері ASTM D2782 стандартына сәйкес Тимкен стендіде талданады. Фуллерен концентрациясын бәсекелес әсерлерді теңестіру үшін оңтайландыру қажеттілігі анықталды. Зерттеу фуллерендердің қорғаныш трибоқабқыша қалыптастыру және нанопарикті мойынтіректер ретінде әрекет ету арқылы тозуды азайтатынын көрсетеді, оңтайлы концентрациялар 536 г жүктемеде  $0,196 \cdot 10^{-3}$  масс.% және 1072 г жүктемеде  $0,098 \cdot 10^{-3}$  масс.% және  $0,328 \cdot 10^{-3}$  масс.% құрайды. Төмен концентрацияларда (мысалы,  $0,066 \cdot 10^{-3}$  масс.%) трибоқабқыша жеткіліксіз қалыптасады, ал жоғары концентрацияларда (мысалы,  $0,262 \cdot 10^{-3}$  масс.% және  $0,392 \cdot 10^{-3}$  масс.%) агломерация тозуды арттырады. Тозу көлемінің фуллерен концентрациясына байланысты W-пішінді тренді күрделі, сызықты емес өзара әрекеттесуді көрсетеді. Нақты майлар мен жүктемелер үшін концентрацияны дәл оңтайландыру маңызды екені дәлелденді, бұл тұрақты тозуға қарсы қорғаныс үшін қосымша зерттеулерді талап етеді.

#### Ключевые слова:

моторное масло,  
фуллерен, нанодобавка,  
тест Тимкена,  
трибологические  
свойства,  
износостойкость,  
углеродные

#### АННОТАЦИЯ

Эта статья посвящена улучшению трибологических свойств моторного масла И-20А с помощью фуллереновых добавок. Анализируются изменения объема износа при нагрузках 536 г и 1072 г с использованием установки Тимкена в соответствии со стандартом ASTM D2782. Выявлена необходимость оптимизации концентрации фуллеренов для балансировки конкурирующих эффектов. Исследование показывает, что фуллерены снижают износ за счет формирования защитного трибофильма и действия



наноматериалы,  
защитная трибопленка.

в качестве наноподшипников, с оптимальными концентрациями  $0,196 \cdot 10^{-3}$  мас.% при 536 г и  $0,098 \cdot 10^{-3}$  мас.% и  $0,328 \cdot 10^{-3}$  мас.% при 1072 г. Низкие концентрации (например,  $0,066 \cdot 10^{-3}$  мас.%) приводят к недостаточному образованию трибофильма, а высокие (например,  $0,262 \cdot 10^{-3}$  мас.% и  $0,392 \cdot 10^{-3}$  мас.%) увеличивают износ из-за агломерации. W-образная зависимость объема износа от концентрации фуллеренов отражает сложное нелинейное взаимодействие. Установлено, что точная оптимизация концентрации критична для конкретных масел и нагрузок, требующая дальнейших исследований для стабильной защиты от износа.

#### Keywords:

motor oil, fullerene, nano-additive, Timken test, tribological properties, wear resistance, carbon nano-materials, protective tribofilm.

#### ABSTRACT

This article investigates the enhancement of tribological properties of I-20A motor oil through fullerene additives. Wear volume variations under 536 g and 1072 g loads are analyzed using a Timken test rig per ASTM D2782 standards. The need to optimize fullerene concentration is identified to balance competing effects. The study shows that fullerenes reduce wear by forming a protective tribofilm and acting as nano-ball bearings, with optimal concentrations of  $0.196 \cdot 10^{-3}$  wt% at 536 g and  $0.098 \cdot 10^{-3}$  wt% and  $0.328 \cdot 10^{-3}$  wt% at 1072 g. Low concentrations (e.g., 0.066 wt%) result in inadequate tribofilm formation, while high concentrations (e.g.,  $0.262 \cdot 10^{-3}$  wt% and  $0.392 \cdot 10^{-3}$  wt%) increase wear due to agglomeration. A W-shaped trend in wear volume versus fullerene concentration reflects complex, nonlinear interactions. Precise concentration optimization is critical for specific oils and loads, requiring further research for consistent anti-wear performance.

#### КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы автомобиль қозғалтқыштары жоғары жүктеме, температура және айналу жиілігі жағдайында жұмыс істейді, бұл майлау материалдарына қатаң талаптар қояды. Тиімді майлау үйкеліс пен тозуды азайту, механизмдердің қызмет ету мерзімін ұзарту, энергия тиімділігін арттыру және көміртек шығарындыларын төмендету үшін шешуші рөл атқарады (Kotia және т.б., 2020). Дәстүрлі мотор майларынан айырмашылығы, И-20А өнеркәсіптік майы үйкеліс беттерін қорғауға арналған қоспалар жиынтығын қамтымайды, бұл оның шектік немесе аралас майлау жағдайларындағы жұмыс тиімділігін шектейді (Serdobintsev және т.б., 2021). Соңғы жылдары фуллерендер, көміртек нанотүтіктері және графен сияқты көміртекті наноматериалдар (Goodarzi және т.б., 2019) майлағыштардың трибологиялық және термофизикалық қасиеттерін жақсарту қабілетіне байланысты айтарлықтай назар аудартты (Zin және т.б., 2014).

Фуллерендер ( $C_{60}$ ) өздерінің бірегей сфералық құрылымының арқасында жоғары беріктік, төмен адгезия және сырғанау үйкелісін домалау үйкелісіне түрлендіре алатын наноподшипниктер ретіндегі қасиеттерге ие (Falvo және т.б., 1997). Мұндай сипаттамалар оларды майлау майларына арналған перспективалы қоспалар етеді, өйткені олар үйкеліс коэффициентін (COF) және бет тозуын төмендетеді (Tóth-Nagy және т.б., 2023). Мысалы, зерттеулер көрсеткендей, фуллерендерді минералды майларға қосу тікелей металл-металл жанасуын азайтатын қорғаныс трибопленкасын түзе отырып, тозуды айтарлықтай төмендетеді (Huang және т.б., 2019). Алайда фуллерендердің тиімділігі олардың концентрациясына (Nadooshan және т.б., 2017), дисперсиялау әдісіне, суспензияның тұрақтылығына және негізгі маймен өзара әрекеттесуіне байланысты болады (Esfe және т.б., 2017). Жоғары концентрацияда фуллерендер агломераттар түзіп, абразивтік әсердің салдарынан трибологиялық қасиеттердің нашарлауына әкелуі мүмкін (Missana және т.б., 2000; Rafiq және т.б., 2016).



Тағы бір маңызды аспект — наноматериалдардың майлардың реологиялық қасиеттеріне, атап айтқанда тұтқырлық пен тұтқырлық индексіне (VI) әсері. Зерттеулер көрсеткендей, фуллерендер немесе көміртек нанотүтіктері сияқты көміртекті нанобөлшектерді қосу базалық майлардың тұтқырлығын арттырып, май қабатының қалыңдығын ұлғайтады, бірақ сонымен қатар гидродинамикалық кедергіні де көбейтеді (Shababi және т.б., 2018; Afrand және т.б., 2016). Мысалы, SAE-40 майына бірқабырғалы көміртек нанотүтіктердің (SWCNHs) көлемдік үлесі 0,01 % мөлшерінде қосылған жағдайда, шектік майлау режимінде үйкеліс коэффициенті 12 %-ға төмендегені байқалған, бірақ тұтқырлық артқан (Иванов және т.б., 2017; Holmberg және т.б., 2014). Мұндай өзгерістер нанобөлшектердің концентрациясын мұқият оңтайландыруды қажет етеді, өйткені үйкеліс пен тозуға қарсы қасиеттерді жақсартатын отырып, майдың ағымдылығына (сұйықтық қасиеттеріне) теріс әсер етпеуі маңызды.

Фуллерендермен модификацияланған майлау майларының трибологиялық қасиеттері бойынша жүргізілген зерттеулер олардың үйкеліс пен тозуды азайтудағы жоғары тиімділігін көрсетеді, бұл әсіресе жоғары жүктеме жағдайында қолданылатын мотор майлары үшін өзекті. Осы ғылыми деректер аталған зерттеумен тікелей байланысты, себебі бұл жұмыста әртүрлі жүктемелер кезінде И-20А өнеркәсіптік майларына фуллерен қоспаларының үйкеліс сипаттамаларына әсері Тимкен сынау әдісі арқылы зерттелді. Эксперименттер 536 г және 1072 г жүктемелерде жүргізілді. Зерттеудің мақсаты — Тимкен сынағы арқылы фуллерендердің әртүрлі концентрацияларының өнеркәсіптік майлардың үйкеліс сипаттамаларына әсерін бағалау.

#### МАТЕРИАЛДАР МЕН ӘДІСТЕМЕЛЕР

Эксперименттер жоғары жанасу қысымдары кезінде майлағыш материалдардың тозуы қарсы тұру қасиеттерін бағалауға арналған стандартты Тимкен сынақ құрылысында (1-сурет) жүргізілді. Сынақтар ASTM D2782 стандартына сәйкес орындалды. Зерттеу алдында құрылғы И-20А майының бақылау үлгілері арқылы калибрленіп, өлшеу нәтижелерінің қайталанғыштығы тексерілді.



**1-сурет.** Майлардың үйкеліс және тозуға қарсы қасиеттерін бағалауға арналған

Тимкен сынақ құрылысы

*Ескерту – фото авторлар тарапынан түсірілген*

Бұл зерттеуде базалық май ретінде қолданылған И-20А өнеркәсіптік майы – көп мақсатты минералды май, ол өзінің әмбебап физика-химиялық қасиеттеріне байланысты түрлі механизмдерде кеңінен қолданылады. Гидравликалық және майлау майлары тобына жататын И-20А майының кинематикалық тұтқырлығы 40 °C температурада 29-35 мм<sup>2</sup>/с аралығында болады, бұл орташа жүктеме кезінде үйкеліс беттерінің тікелей жанасуын болдырмайтын жеткілікті майлау қабатының қалыңдығын қамтамасыз етеді. Майдың тығыздығы 20 °C-та 870-890 кг/м<sup>3</sup>, ал қату температурасы – 15 °C пен – 20 °C аралығында,



бұл оны қоңыржай климаттық жағдайларда пайдалануға жарамды етеді. Құрамында қоспалар мөлшері аз болғандықтан, ол қосымша химиялық компоненттердің трибологиялық қасиеттерге әсерін төмендетеді және фуллерен сияқты наноқоспалардың әсерін зерттеу үшін тиімді базалық май болып табылады.

Зерттеу барысында базалық И-20А майы құрамында 5 % фуллерен бар коммерциялық маймен араластырылып, нәтижесінде фуллереннің келесі массалық үлестері бар композициялар дайындалды: 0; 0,066; 0,098; 0,196; 0,262; 0,294; 0,328 және 0,392  $\times 10^{-3}$  масс. %. Әрбір сынақ статистикалық сенімділікті қамтамасыз ету мақсатында үш рет қайталанды. Сынақтар екі жүктеме деңгейінде жүргізілді: 536 г және 1072 г.

Негізгі өлшенген параметрлер:

- тозу дағының ені ( $b$ , мм);
- тозу дағының ұзындығы ( $l$ , мм);
- тозу дағының тереңдігі ( $h$ , мм).

Әрбір өлшеу нәтижелері кестелерге енгізіліп, сол мәліметтер негізінде фуллерен концентрациясына байланысты тозу сипаттамаларының өзгерісін бейнелейтін графиктер тұрғызылды.

### НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

536 г жүктеме

536 г жүктемедегі сынақ нәтижелері фуллерендерді И-20А майына енгізу трибологиялық қасиеттерге күрделі әсер ететінін көрсетеді (1-кесте).

**1-кесте.** 536 г жүктемеде И-20А майы бойынша өлшеу нәтижелері

Фуллерен мөлшері ( $\times 10^{-3}$ масс.%)	Уақыт, $t$ (мин)	Тозу дағының ені, $b$ (мм)	Тозу дағының ұзындығы, $l$ (мм)	Тозу дағының тереңдігі, $h$ (мм)	Тозу көлемі ( $\text{мм}^3$ )
0	1	3,55	5,45	0,14	2,71
	2	3,66	5,51	0,145	2,92
	3	3,74	5,65	0,16	3,38
0,066	1	3,65	5,81	0,1	2,12
	2	3,76	5,88	0,14	3,1
	3	3,89	6,01	0,16	3,74
0,098	1	3,88	5,9	0,15	3,43
	2	4,01	6,12	0,2	4,91
	3	4,1	6,2	0,2	5,08
0,196	1	3,44	5,28	0,12	2,18
	2	3,55	5,42	0,14	2,69
	3	3,66	5,65	0,16	3,31
0,262	1	3,8	6,22	0,18	4,25
	2	3,94	6,38	0,19	4,78
	3	4,01	6,43	0,2	5,16
0,294	1	3,66	5,77	0,12	2,53
	2	3,72	5,94	0,15	3,31
	3	3,83	6,04	0,16	3,7
0,328	1	3,32	5,47	0,14	2,54
	2	3,66	5,7	0,16	3,34
	3	3,89	5,82	0,17	3,85
0,392	1	3,56	5,9	0,14	2,94
	2	3,83	6	0,16	3,68
	3	3,91	6,16	0,18	4,34

Ескерту – авторлар құрастырған



Трибологиялық қасиеттердің өзгерісін тереңірек түсіну мақсатында фуллерен концентрациясы, сынақ ұзақтығы және тозу сипаттамалары арасындағы байланысты көрсету үшін график тұрғызылды (2-сурет). Фуллерендерсіз базалық И-20А майында тозу көлемі сынақ уақытының өсуімен біртіндеп артады — 1 минутта  $2,71 \text{ мм}^3$ -тен 3 минутта  $3,38 \text{ мм}^3$ -ке дейін. Бұл жоғары жанасу қысымында модификацияланбаған май үшін күтілетін қалыпты сипаттамаға сәйкес келеді.

$0,066 \cdot 10^{-3}$  масс. % массалық үлесте тозу көлемі 1 минутта сәл жақсарып ( $2,12 \text{ мм}^3$ ), бірақ 2 және 3 минутта нашарлайды (тиісінше  $3,10$  және  $3,74 \text{ мм}^3$ ). Бұл, шамасы, нанобөлшектердің біркелкі таралмауынан туындаған жергілікті абразивтік әсерлермен түсіндіріледі.

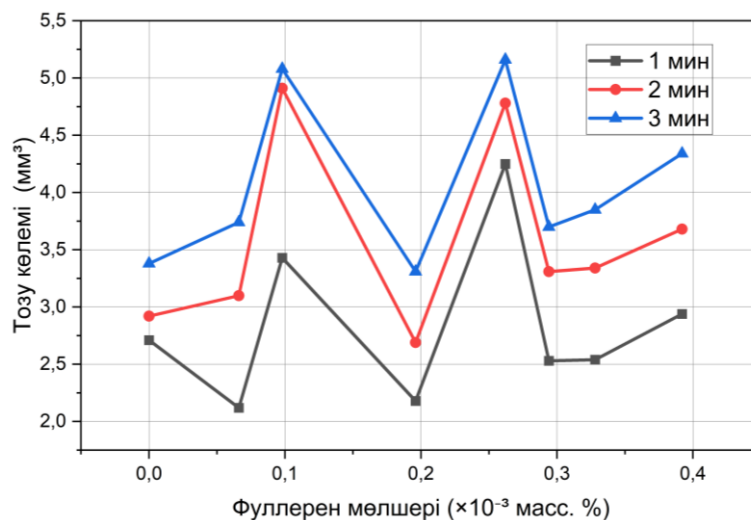
$0,098 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда барлық сынақ ұзақтығында айқын нашарлау байқалады ( $3,43$ ;  $4,91$  және  $5,08 \text{ мм}^3$ ), бұл фуллерендердің шамадан тыс агрегациясының нәтижесінде тұрақты трибопенка түзілуінің бұзылуымен байланысты болуы мүмкін.

$0,196 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда ең жақсы нәтижелер алынды — 1, 2 және 3 минутта сәйкесінше  $2,18$ ;  $2,69$  және  $3,31 \text{ мм}^3$ . Бұл көрсеткіштер фуллерен мөлшері мен қорғаныш трибопенкасының түзілуі арасындағы тиімді теңгерімді көрсетеді.

$0,262 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда майдың трибологиялық қасиеттері күрт нашарлап, тозу көлемі  $4,25$ – $5,16 \text{ мм}^3$  деңгейіне дейін өседі. Бұл шамадан тыс нанобөлшек агрегациясының әсерінен абразивтік тозудың артуымен және трибопенканың қорғаныш әсерінің әлсіреуімен түсіндіріледі.

Жоғары концентрациялар ( $(0,294$ – $0,392) \cdot 10^{-3}$  масс. %) кезінде нәтижелер біршама тұрақтанғанымен (мысалы,  $0,294 \cdot 10^{-3}$  масс. % кезінде  $2,53 \text{ мм}^3$  және  $0,328 \cdot 10^{-3}$  масс. % кезінде  $2,54 \text{ мм}^3$  — 1 минутта), олар  $0,196 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрациясындағы нәтижелерден төмен болып қалды. Мұндай жағдай күрделі бейсызық өзара әрекеттесулермен, атап айтқанда агломерация мен дисперсия тұрақсыздығының басым әсерімен түсіндіріледі.

Осылайша, тозуға қарсы қасиеттерді арттырудың оңтайлы концентрациясы —  $0,196 \cdot 10^{-3}$  масс. %, бұл жағдайда тұрақты қорғаныш трибопенка түзіліп, әсіресе қысқа мерзімді жүктемелер кезінде тозуды айтарлықтай төмендетеді



**2-сурет.** 536 г жүктемеде И-20А майындағы фуллерен концентрациясына байланысты тозу параметрлерінің тәуелділігі

Ескерту – авторлар құрастырған



1072 г жүктеме

Жүктеме 1072 г дейін арттырылған жағдайда, эксперименттік деректер фуллерен қоспаларының әсері айқынырақ болатынын көрсетеді (2-кесте).

**2-кесте.** 1072 г жүктемеде И-20А майы бойынша өлшеу нәтижелері.

Фуллерен мөлшері ( $\times 10^{-3}$ масс. %)	Уақыт, t (мин)	Тозу дағының ені, b (мм)	Тозу дағының ұзындығы, l (мм)	Тозу дағының тереңдігі, h (мм)	Тозу көлемі ( $\text{мм}^3$ )
0	1	5,15	7,84	0,35	14,13
	2	5,23	8,18	0,39	16,68
	3	5,36	8,43	0,4	18,07
0,066	1	5,1	8,33	0,34	14,44
	2	5,38	8,69	0,38	17,77
	3	5,58	8,85	0,4	19,75
0,098	1	4,68	7,74	0,28	10,14
	2	4,87	7,92	0,3	11,57
	3	4,97	8,18	0,31	12,6
0,196	1	5,02	7,77	0,33	12,87
	2	5,1	7,96	0,36	14,61
	3	5,2	8,06	0,37	15,51
0,262	1	5,02	8,61	0,33	14,26
	2	5,14	8,67	0,35	15,6
	3	5,18	8,71	0,37	16,69
0,294	1	5,15	8,27	0,34	14,48
	2	5,25	8,31	0,35	15,27
	3	5,32	8,42	0,36	16,13
0,328	1	4,6	7,72	0,29	10,3
	2	4,67	7,79	0,3	10,91
	3	4,92	8,08	0,31	12,32
0,392	1	5,03	8,18	0,32	13,17
	2	5,09	8,24	0,35	14,68
	3	5,24	8,32	0,36	15,69

*Ескерту – авторлар құрастырған*

Трибологиялық сипаттамасын тереңірек түсіндіру мақсатында фуллерен концентрациясы мен сынақ ұзақтығының тозу сипаттамаларына әсерін көрсету үшін график тұрғызылды (3-сурет). Фуллерен қоспалары жоқ базалық И-20А майында тозу көлемі сынақ уақытының ұзаруымен бірге біртіндеп өседі – 1 минутта 14,13  $\text{мм}^3$ -тен 3 минутта 18,07  $\text{мм}^3$ -ке дейін. Бұл жоғары жанасу қысымында модификацияланбаған майға тән қалыпты сипаттама болып табылады.

0,066- $10^{-3}$  масс. % массалық үлестегі фуллерен концентрациясында тозу сипаттамалары нашарлайды: 1, 2 және 3 минутта сәйкесінше 14,44; 17,77 және 19,75  $\text{мм}^3$ , әсіресе 3 минуттағы тозу көлемі базалық май көрсеткішінен жоғары болады. Мұның себебі фуллерендердің біркелкі таралмауынан туындайтын жергілікті абразивтік әсерлер болуы ықтимал.

0,098- $10^{-3}$  масс. % концентрацияда айқын жақсару байқалады: тозу көлемі тиісінше 10,14; 11,57 және 12,6  $\text{мм}^3$  құрап, қорғаныш трибопленкасының тиімді түзілуін және тозудың азаюын көрсетеді.

0,196- $10^{-3}$  масс. % концентрацияда тозу көлемдері (12,87; 14,61 және 15,51  $\text{мм}^3$ ) алдыңғы нұсқадан (0,098%) төмендеу нәтиже береді, бірақ әлі де базалық майдан жақсырақ.



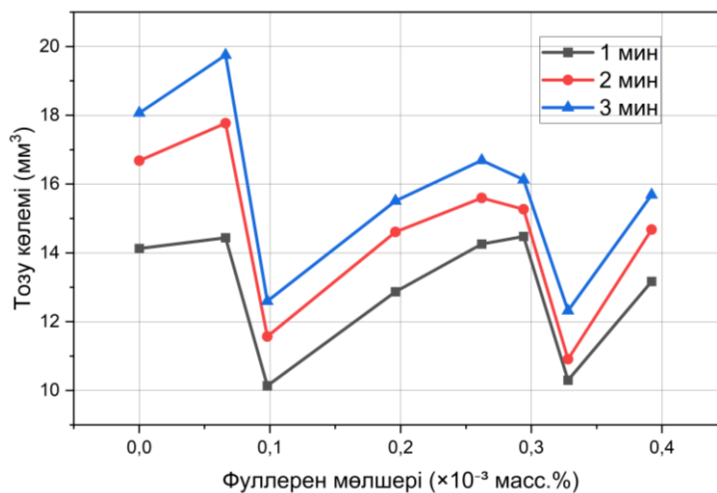
Бұл, шамасы, нанобөлшектердің агрегациясының басталуымен және трибопленканың тиімділігінің азаюымен байланысты.

$0,262 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда алынған нәтижелер (14,26; 15,6 және 16,69 мм<sup>3</sup>) базалық маймен шамалас болып, фуллерендердің оң және теріс әсерлері арасындағы тепе-теңдікті көрсетеді. Сол сияқты,  $0,294 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда (14,48; 15,27 және 16,13 мм<sup>3</sup>) әсер бейтарап сипатта болып, базалық май нәтижелеріне жақын мәндер көрсетеді.

Ең жақсы нәтижелер  $0,328 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда байқалды: 1, 2 және 3 минуттағы тозу көлемдері сәйкесінше 10,3; 10,91 және 12,32 мм<sup>3</sup>. Бұл көрсеткіштер фуллерендердің оңтайлы дисперсиялануы мен берік қорғаныш трибопленкасының түзілуіне байланысты.

Алайда,  $0,392 \cdot 10^{-3}$  масс. % концентрацияда нәтижелер қайта нашарлап, тозу көлемдері (13,17; 14,68 және 15,69 мм<sup>3</sup>) артты. Бұл фуллерендердің шамадан тыс агрегациясынан туындайтын абразивтік тозудың күшеюімен түсіндіріледі.

Осылайша, 1072 г жүктемеде тозу көлемін азайтудың оңтайлы концентрациялары —  $0,098 \cdot 10^{-3}$  масс. % және  $0,328 \cdot 10^{-3}$  масс. %, бұл мәндерде фуллерендердің қорғаныш трибопленка түзілуімен байланысты оң әсері басым болады. Ал жоғары концентрациялар кезінде агрегация сияқты бейсызық әсерлер трибологиялық қасиеттерге кері ықпал етеді



**3-сурет.** 1072 г жүктеме кезінде И-20А майындағы фуллерен концентрациясына байланысты сызықтық тозу параметрлерінің тәуелділігі

*Ескерту – авторлар құрастырған*

И-20А майына фуллерен қоспалары енгізіліп, 536 г және 1072 г жүктемелерде жүргізілген трибологиялық сынақтардың нәтижелері фуллерендердің майдың тозуға қарсы қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл әсер фуллерен концентрациясына және жүктеме жағдайына байланысты өзгереді. Орташа концентрациялар кезінде фуллерендер тозуға төзімділікті арттырады, ал тым төмен немесе тым жоғары концентрациялар нашар дисперсия немесе шамадан тыс агрегация салдарынан кері әсер етуі мүмкін. Оптималды концентрация қолданылған жүктемеге тәуелді, сондықтан трибологиялық тиімділікті арттыру үшін нақты мөлшерлеуді дәл анықтау қажет.

Нәтижелерді талқылау. 536 г және 1072 г жүктеме кезінде тозу көлемі деректерін талдау (2 және 3-суреттер) фуллерен концентрациясы мен трибологиялық қасиеттер арасындағы «W-тәрізді» тәуелділікті көрсетеді. Бұл тәуелділік, яғни тозу көлемінің төмен



мәндерімен шектелген жоғары тозу аймақтарының ауысуы, фуллерен концентрациясы мен трибологиялық қасиеттердің күрделі өзара байланысын көрсетеді.

Оң әсерлер: Фуллерендер трибологиялық қасиеттерді бірнеше механизм арқылы жақсартады. Біріншіден, олар берікті қорғаныс трибопленкасының түзілуін қамтамасыз етеді, ол үйкелісті азайтып, беттердің тозуға төзімділігін арттырады. Екіншіден, фуллерендер «нано-шарикті подшипник» сияқты әсер беріп, сырғанау емес, айналу қозғалысын туғызады, бұл үйкеліс шығынын азайтады. Сонымен қатар, фуллерендердің енгізілуі майдың тұтқырлығын және тұтқырлық индексын арттырады (Zin және басқалары, 2014; Shababi және басқалары, 2018; Afrand және басқалары, 2016). Бұл әсерлер әсіресе орташа фуллерен концентрацияларында (мысалы, 536 г кезінде  $0.196 \times 10^{-3}$  масс.%, 1072 г кезінде  $0.098 \times 10^{-3}$  масс.% және  $0.328 \times 10^{-3}$  масс.%) айқын байқалады, мұнда тозу көлемі базалық маймен салыстырғанда едәуір төмендейді.

Теріс әсерлер: Керісінше, фуллерендер кейбір жағдайларда трибологиялық қасиеттерге теріс әсер етуі мүмкін. Төмен концентрацияларда (мысалы,  $0.066 \times 10^{-3}$  масс.%) фуллерендердің жеткіліксіз таралуы тиімді трибопленка түзуге кедергі келтіреді, бұл нанобөлшектердің біркелкі таралмауынан туындаған жергілікті абразивтік әсерлерге әкеледі. Жоғары концентрациялар кезінде (мысалы, 536 г кезінде  $0.262 \times 10^{-3}$  масс.%, 1072 г кезінде  $0.392 \times 10^{-3}$  масс.%) фуллерендердің шамадан тыс агрегациясы абразивтік шоғырлардың түзілуіне әкеледі, олар пайдалы нано-шариктер емес, қатты абразивті бөлшектер ретінде әрекет етіп, тозуды арттырады. Сонымен қатар, фуллерендердің енгізілуі май тұтқырлығын арттырады, бұл пленка қалыңдығын ұлғайтқанымен, гидродинамикалық кедергіні күшейтіп, ағындылықты төмендетуі және энергия шығынын арттыруы мүмкін (Иванов және басқалары, 2017; Holmberg және басқалары, 2014). Бұл әсіресе жоғары концентрацияларда айқын байқалады, мұнда пленка қалыңдығының артуы мен ағымдылықтың төмендеуі арасындағы теңгерім бұзылады.

Тозу көлемінің «W-тәрізді» сипаты май матрицасындағы фуллерендердің бейсыздық әрекеттесу динамикасын көрсетеді, сондықтан оң және теріс әсерлердің тепе-теңдігін сақтау үшін фуллерен концентрациясын мұқият оңтайландыру қажет. Оптималды концентрациялар ( $0.196 \times 10^{-3}$  масс.% – 536 г кезінде және  $0.098 \times 10^{-3}$  масс.% пен  $0.328 \times 10^{-3}$  масс.% – 1072 г кезінде) трибопленка түзілуі, нано-шарикті әсер және тұтқырлықтың артуы арасындағы синергияны қамтамасыз етеді, нәтижесінде тозу минималданады. Осы шектерден ауытқу кезінде абразивтік әсер мен реологиялық теңгерімсіздік себебінен трибологиялық қасиеттер нашарлайды. Болашақ зерттеулер фуллерендердің диспергирлеу әдістерін жетілдіруге, оларды әртүрлі базалық май құрамдарымен үйлесімділігін бағалауға және әртүрлі жүктеме мен температура жағдайларында олардың тиімділігін зерттеуге бағытталуы тиіс.

### **ҚОРЫТЫНДЫ**

Фуллерендер И-20А майының трибологиялық қасиеттерін жақсартуда айтарлықтай әлеуетке ие екені анықталды. Ең тиімді нәтижелер 536 г жүктемеде —  $0.196 \times 10^{-3}$  масс.%, ал 1072 г жүктемеде —  $0.098 \times 10^{-3}$  масс.% және  $0.328 \times 10^{-3}$  масс.% концентрацияларында байқалды. Бұл жағдайларда тиімді трибопленка түзілуі нәтижесінде тозу көлемі айтарлықтай төмендеді.

Алайда, фуллерендердің агрегациясы мен дисперсия тұрақсыздығына байланысты байқалатын бейсыздық сипаттамасы төмен және жоғары концентрациялар кезінде майдың тиімділігін шектейді.



Болашақ зерттеулер фуллерендердің май матрицасындағы диспергирленуін және тұрақтылығын оңтайландыруға бағытталуы тиіс. Бұл олардың тозуға қарсы қасиеттерін кең жұмыс жағдайларында тұрақты түрде қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

**МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ:** Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

**ҚАРЖЫЛАНДЫРУ:** Бұл зерттеу *Dragon Lakshme Group KZ* компаниясының қаржылай қолдауымен жүргізілді.

**АЛҒЫС:** Авторлар қолжазбаны қарауға және пікір білдіруге уақыт бөлген анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

**ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ:** Авторлар мәтіндегі тілдік қателерді түзету және ғылыми стильді жетілдіру мақсатында ChatGPT (OpenAI, 2025) құралын пайдаланған.

OpenAI. (2025, September 30). *ChatGPT (GPT-5)*. Assistance with correction of linguistic errors and improvement of scientific style [Large language model]. OpenAI. <https://chat.openai.com>

#### ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Kotia, A., Chowdary, K., Srivastava, I., Ghosh, S. K., & Ali, M. K. A. (2020). Carbon nanomaterials as friction modifiers in automotive engines: recent progress and perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 310, 113200. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113200>
- Serdobintsev, Y. P., Kukhtik, M. P., & Kuach, D. K. (2021, April). A Study of the Influence of Surface Layer Properties on the Tribotechnical Characteristics of Plain Machine Tool Slideways. In *International Conference on Industrial Engineering* (pp. 1236-1245). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8\\_143](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_143)
- Goodarzi, M., Toghraie, D., Reiszadeh, M., & Afrand, M. (2019). Experimental evaluation of dynamic viscosity of ZnO–MWCNTs/engine oil hybrid nanolubricant based on changes in temperature and concentration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(2), 513-525. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7707-8>
- Zin, V., Agresti, F., Barison, S., Colla, L., Mercadelli, E., Fabrizio, M., & Pagura, C. (2014). Tribological properties of engine oil with carbon nano-horns as nano-additives. *Tribology Letters*, 55(1), 45-53. <https://doi.org/10.1007/s11249-014-0330-3>
- Falvo, M. R., Clary, G. J., Taylor, R. M., Chi, V., Brooks Jr, F. P., Washburn, S., & Superfine, R. (1997). Bending and buckling of carbon nanotubes under large strain. *Nature*, 389(6651), 582-584. <https://doi.org/10.1038/39282>
- Tóth-Nagy, C., & Szabó, Á. I. (2023). Experimental Investigation of the Friction Modifying Effects of Graphene and C60 Fullerene Used as Nanoadditives in Engine Lubricating Oil Performed on an Oscillating Tribometer. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 51(3), 257-262. <https://doi.org/10.3311/PPtr.20594>
- Huang, P., Qi, W., Yin, X., Choi, J., Chen, X., Tian, J., ... & Luo, J. (2019). Ultra-low friction of aC: H films enabled by lubrication of nanodiamond and graphene in ambient air. *Carbon*, 154, 203-210. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.08.010>
- Nadooshan, A. A., Esfe, M. H., & Afrand, M. (2017). Evaluation of rheological behavior of 10W40 lubricant containing hybrid nano-material by measuring dynamic viscosity. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 92, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.05.011>
- Esfe, M. H., & Sarlak, M. R. (2017). Experimental investigation of switchable behavior of CuO-MWCNT (85%–15%)/10W-40 hybrid nano-lubricants for applications in internal combustion engines. *Journal of Molecular Liquids*, 242, 326-335. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.06.075>



- Missana, T., & Adell, A. (2000). On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 230(1), 150-156. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7003>
- Rafiq, M., Lv, Y., & Li, C. (2016). A review on properties, opportunities, and challenges of transformer oil-based nanofluids. *Journal of nanomaterials*, 2016(1), 8371560. <https://doi.org/10.1155/2016/8371560>
- Shababi, K., Firouzi, M., & Fakhar, A. (2018). An experimental study on rheological behavior of SAE50 engine oil: effects of temperature and hybrid nano-materials composed of 20 vol% MWCNTs and 80 vol% TiO<sub>2</sub>. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2311-2320. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6693-6>
- Afrand, M., Najafabadi, K. N., & Akbari, M. (2016). Effects of temperature and solid volume fraction on viscosity of SiO<sub>2</sub>-MWCNTs/SAE40 hybrid nanofluid as a coolant and lubricant in heat engines. *Applied Thermal Engineering*, 102, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.002>
- Ivanov, M., & Shenderova, O. (2017). Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(1), 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.07.003>
- Holmberg, K., Andersson, P., Nylund, N. O., Mäkelä, K., & Erdemir, A. (2014). Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*, 78, 94-114. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.004>

**Авторлар туралы мәліметтер**  
**Информация об авторах**  
**Information about authors**



**Накысбеков Жасулан Турсункалиевич** – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы қ., Қазақстан

**Накысбеков Жасулан Турсункалиевич** – PhD, старший преподаватель Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан

**Nakysbekov Zhassulan Tursynkaliyevich** – PhD, Senior Lecturer at Al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi, 71, Almaty, Kazakhstan

e-mail: Zhassulan.Nakysbekov@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-3419-6908>



**Чернышев Дмитрий Владимирович** – Dragon Lakshme Group KZ компаниясының бас директоры әрі негізін қалаушысы, Ходжанова көш., 92-77, Алматы қ., Қазақстан

**Чернышев Дмитрий Владимирович** – генеральный директор и сооснователь Dragon Lakshme Group KZ, ул. Ходжанова, 92-77, г. Алматы, Казахстан

**Chernyshev Dmitrii Vladimirovich** – CEO & co Founder Dragon Lakshme Group KZ, Khodzhanova st. 92 -77, Almaty, Kazakhstan

e-mail: ceo@dragonlg.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2772-5211>



**Айтжанов Мәди Бауржанович** – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға ғылыми қызметкері, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы қ., Қазақстан

**Айтжанов Мәди Бауржанович** – старший научный сотрудник Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан

**Aitghanov Madi Bauryzhanovich** – Senior Research Fellow at Al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi, 71, Almaty, Kazakhstan  
e-mail: madi.aitghanov@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3681-2727>



**Исмаилов Дәнияр Валерьевич** – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті Физика факультетінің радиациялық физика және функционалды материалдар зертханасының меңгерушісі, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы қ., Қазақстан

**Исмаилов Дәнияр Валерьевич** – PhD, заведующий лабораторией радиационной физики и функциональных материалов факультета физики Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан

**Ismailov Daniyar Valeriyevich** – PhD, Head of the Laboratory of Radiation Physics and Functional Materials at the Faculty of Physics of al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi, 71, Almaty, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

e-mail: ismailov\_daniyar\_v@bk.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6384-1478>



**Партизан Гүлмайра** – PhD, Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы төрағасының орынбасары, Шевченко көшесі, 15, Алматы, Қазақстан.

**Партизан Гүлмайра** – PhD, заместитель председателя Национального центра космических исследований и технологий, ул. Шевченко, 15, Алматы, Казахстан.

**Partizan Gulmaira** – PhD, Deputy Chairman of the National center for space research and technology, 15, Shevchenko St., Almaty, Kazakhstan  
e-mail: gulmira.partizan@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1989-8282>



**Суюндықова Гүлнұр Серікқалиевна** – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы қ., Қазақстан

**Суюндықова Гүлнұр Серікқалиевна** – старший преподаватель Казахского национального университета имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, г. Алматы, Казахстан

**Suyundykova Gulnur Serikkalievna** – Senior Lecturer at Al-Farabi Kazakh National University, ave. Al-Farabi, 71, Almaty, Kazakhstan  
e-mail: sgserikkalievna@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5221-4233>