

УДК 621.831.004.55

DOI: 10.18372/0370-2197.3(100).17892

*М. В. КІНДРАЧУК, В. Б. МЕЛЬНИК, Д. В. ЛЕУСЕНКО, О. В. ГЕРАСИМОВ**Національний авіаційний університет, Україна*

## **ВИБІР РЕДУКТОРНИХ ОЛИВ ЗА ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

*Проведений порівняльний аналіз ефективності роботи мінеральних та синтетичних редукторних олив за основними (стандартними) фізико-хімічними характеристиками. Наведені основні вимоги до редукторних олив, які формулюються сьгодні провідними виробниками зубчастих передач та відображаються у міжнародних специфікаціях та стандартах. Зроблені висновки стосовно сумісності мінеральних та синтетичних редукторних олив.*

**Ключові слова:** мінеральні та синтетичні редукторні оливи, фізико-хімічні характеристики, діапазон робочих температур, стійкість до старіння, захист від корозії, сумісність із еластомерами, в'язкість.

**Вступ.** Для змащування закритих зубчастих передач і сьогодні досить часто використовуються мінеральні редукторні оливи. Перехід на змащування редукторів синтетичними маслами проводиться в основному в тому випадку, якщо мінеральні оливи досягають меж своїх можливостей, наприклад, по діапазону робочих температур. Для змащування зубчастих передач найбільшого застосування отримали такі типи синтетичних масел: поліальфаолефіни (ПАО), полігліколі (ПГ), складні ефіри (Е).

За своєю хімічною структурою поліальфаолефіни близькі до мінеральних олив. Тому вони також загальновідомі як оливи на основі синтетичних вуглеводнів. Їхня сумісність з матеріалами ущільнень і фарб відповідає сумісності мінеральних масел, їх утилізують, або регенерують подібним чином, і вони поєднуються з мінеральними маслами. На основі спеціально відібраних базових олив та відповідних присадок редукторні оливи можуть використовуватись у харчовій та фармацевтичній промисловості, відповідаючи вимогам харчового законодавства (оливи з харчовим допуском H1\*). Редукторні оливи на основі ПАО характеризуються гарною стійкістю до старіння, завдяки чому значно збільшуються інтервали заміни олив. Крім цього, вони показують дуже добрі характеристики при низьких температурах.

При використанні полігліколів можна досягти дуже низьких коефіцієнтів тертя. Тому вони добре зарекомендували себе для змащування вузлів тертя з високою часткою тертя ковзання, наприклад, черв'ячних і гіпоїдних передач. При додаванні до складу відповідних присадок ці оливи демонструють дуже високі показники захисту від зносу, що особливо добре проявляється при змащуванні черв'ячних редукторів з парами тертя сталь/бронза.

Поряд з оливами ПАО полігліколеві олії при додаванні до їх складу певних присадок також можуть використовуватися в харчовій та фармацевтичній промисловості (оливи з харчовим допуском H1\*). Ці мастильні матеріали зареєстровані за стандартом NSF H1 і тому відповідають вимогам положення **21 CFR § 178.3570**. Ці мастильні матеріали розроблені для умов непередбаченого контакту з продуктами та упаковкою у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості, а також виробництві кормів для тварин. Таким чином, використання цих мастильних матеріалів підвищує надійність «особливих» виробничих процесів. Тим не менш, можна рекомендувати додатково проводити аналіз ризиків, наприклад, відповідно до рекомендацій НАССР. Полігліколеві

оливи в основному не зміщуються з мінеральними оливами, тому необхідно уникати такого змішування. Внаслідок гарної стійкості до старіння полігліколеві оливи також можуть використовуватися при екстремально високих робочих температурах.

Синтетичні поліефірні оливи є сполуками кислот та спиртів. Є безліч факторів, які впливають на фізико-хімічні властивості, а отже, і змащувальні характеристики. Залежно від типу поліефірні олії характеризуються або високою термічною стійкістю або хорошою працездатністю при низьких температурах. У промислових редукторах використовуються переважно поліефірні оливи, що біологічно швидко розкладаються, які за своїм мастильним ефектом досягають рівня поліальфаолефінів і полігліколів. Поліефірні оливи зміщуються з мінеральними маслами та поліальфаолефінами. З полігліколями вони виможуть поєднуватися тільки за певних умов.

**Постановка завдання.** Для досягнення оптимальної експлуатаційної надійності редукторів протягом усього терміну служби необхідно підходити до вибору мастил не тільки як до необхідного засобу виробництва. Набагато важливіше, щоб вони розглядалися як рівноцінні конструктивні елементи редукторів. Тому в ідеалі вибір та схвалення відповідної редукторної оливи повинні проводитися ще на стадії конструктивного опрацювання нового редуктора. Для правильного вибору редукторної олії необхідно враховувати такі параметри обладнання, як потужність, швидкість обертання, вплив навколишнього середовища та особливі умови експлуатації. На основі цієї інформації можна визначити: тип оливи, захист від зносу, густину олів. З урахуванням цих параметрів редукторні олії в змозі оптимально виконувати свої функціональні завдання, такі як: сприйняття зусилля, зменшення тертя, мінімізація зносу, тепловідведення, відведення продуктів зносу та забруднень. Метою цієї роботи є проведення порівняльного аналізу мінеральних та синтетичних редукторних олій за основними стандартними фізико-хімічними характеристиками мастильних матеріалів.

**Методика досліджень.** Властивості редукторних олів залежать від того, яке базове масло та які присадки використовуються для виготовлення кінцевого продукту. Основні вимоги до редукторних олів, які формулюються сьогодні провідними виробниками зубчастих передач та відображаються у міжнародних специфікаціях та стандартах, це:

- Діапазон робочих температур
- В'язкість відповідно до норм DIN 51509-1.
- Стійкість до старіння ASTM D 2893. [0]
- Характеристики за низьких температур ISO 3016. [1]
- Захист від корозії сталі ISO 7120. / кольорових металів ISO 2160, DIN 51517-3 [5, 6]
- Спінювання ISO 6247 чи ASTM D 892. [2]
- за Флендером відповідно до норм ISO 12152. [3]
- Сумісність із еластомерами: статична сумісність із еластомерами перевіряється відповідно до норм ISO 1817, а динамічна – за нормами DIN 3761. [4]
- Сумісність із внутрішніми лакофарбовими покриттями

**Результати дослідження та їх обговорення.** *Діапазон робочих температур.* Залежно від типу редуктора та умов експлуатації температура олів у промислових редукторах знаходиться в діапазоні від 20 до 150 °С. (при

змащуванні редукторів оливами на мінеральній основі температура оливи не повинна перевищувати 75-80°C.) Нагрівання зубчастих передач, особливо їх шестерень, підшипників і мастильного матеріалу, є найважливішим показником ефективності роботи редуктора. Температури, що встановилися, є показником втрати потужності. Характерні температури в редукторі показані на рис.1.

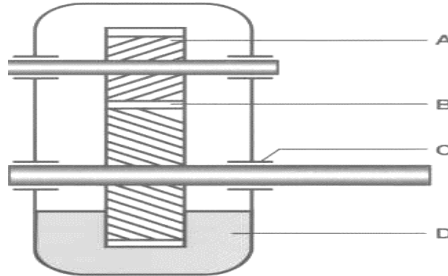


Рис. 1. Характерні температури в редукторі. *A* – температура шестерні; *B* – температури в зубчастому зачепленні; *C* – температура підшипника; *D* – температура в масляній ванні

Поряд із впливами, зумовленими конструктивними характеристиками, температура оливи значною мірою залежить від умов експлуатації. Крім того, вона підвищується як зі збільшенням температури навколишнього середовища, так і внаслідок теплового випромінювання. У порівнянні з режимом експлуатації при повному навантаженні, температури при частковому навантаженні та у переривчастому режимі нижче. Важливо, щоб під час нагрівання окремих компонентів зубчастих передач, оливи та запчастин (фільтруючих елементів, насосів тощо) не перевищували допустимі межі температури (табл. 1). Для вибору в'язкості оливи рівень температури в масляній ванні або температура оливи, що вприскується, є важливим фактором.

Збільшений термін служби редукторної оливи та пов'язані з цим більш тривалі інтервали заміни оливи сприяють зниженню часу простою та економії цінних ресурсів. Крім цього, за певних умов досягається змащування на весь термін служби обладнання (рис. 2).

Таблиця 1

#### Порівняння верхнього рівня робочої температури мінеральної та синтетичних олив

Тип мастила	ISO VG ISO 3448	Індекс в'язкості ISO 2909	Верхній рівень робочих температур (прибл.)
Мінеральна олива	220	$\geq 90$	100°C
Поліальфаолефіни (ПАО)	220	$\geq 150$	140°C
Полігліколи (ПГ)	220	$> 220$	160°C

**В'язкість.** При виборі редукторної оливи в'язкість завжди має першорядне значення, оскільки вона має вирішальний вплив на процес утворення мастильної плівки. Збільшення в'язкості оливи викликає утворення більшої товщини плівки, що в свою чергу підвищує рівень захисту від зносу, покращує демпфуючі властивості і характеристики несучої здатності по задирах.

В'язкість зменшується зі зростанням температури та підвищується зі збільшенням зусилля стиснення. При цьому занадто висока в'язкість може призвести до надмірного нагрівання внаслідок зростаючих втрат від здавлювання

та розбризування масла, особливо при високих швидкостях. З іншого боку, занадто низька в'язкість може призвести до збільшення частки змішаного тертя та підвищення рівня зношування.

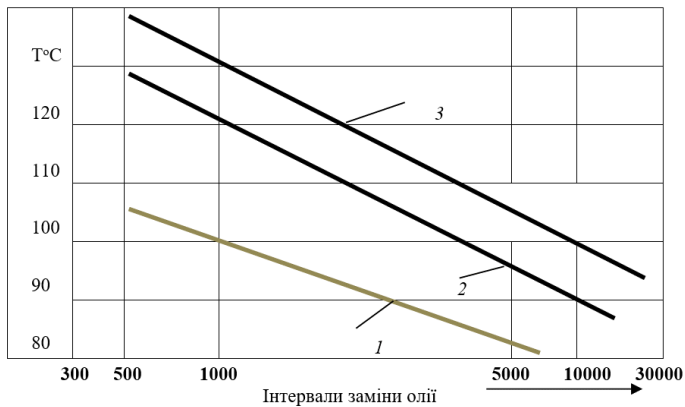


Рис. 2. Термін служби олиї: 1 – мінеральна олия; 2 – Поліальфаолефіни (ПАО); 3 – Полігліколи (ПГ)

У зв'язку з тим, що в'язкість сильно змінюється з температурою, залежність в'язкості оливи від температури визначається, як правило, індексом в'язкості. Чим вище індекс в'язкості редукторної оливи, тим менше її в'язкість змінюється при зміні температури і тим більш плоскою буде в'язкісно-температурна характеристика на діаграмі в'язкості залежно від температури. Ступінь зміни в'язкості під впливом температури залежить як від типу базової оливи, наприклад, мінеральної оливи, поліальфаолефінів, складних ефірів та полігліколів, так і від додаткових присадок, що покращують показник індексу в'язкості. (рис. 3).

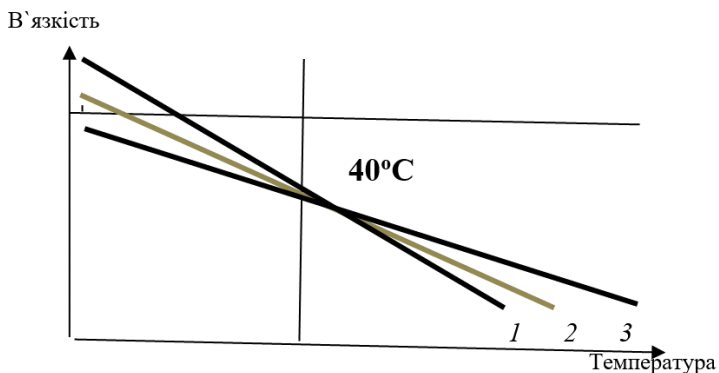


Рис. 3. В'язкісно-температурна характеристика олиї: 1 – мінеральна олива; 2 – Поліальфаолефіни (ПАО); 3 – Полігліколи (ПГ)

При високому індексі в'язкості оливи полегшується запуск обладнання за низьких температур, мінімізуються втрати потужності, а також це сприяє утворенню міцної мастильної плівки, у тому числі і при високих температурах.

Ступінь зміни в'язкості під впливом температури залежить як від типу базової оливи, наприклад, мінеральної оливи, поліальфаолефінів, складних ефірів та полігліколів, так і від додаткових присадок, що покращують показник VI. (табл. 2).

Таблиця 2

## Індекси в'язкості для порівняння

Мінеральна олія	VI	Прибл від 85 до 100.
Поліальфаолефіни (ПАО)	VI	Прибл від 130 до 160.
Полігліколи (ПГ)	VI	Прибл від 150 до 260.

*Характеристики старіння.* Під впливом високої температури, турбулентності повітря та контакту з металевими каталізаторами, такими як мідь, залізо та інші, редуторні оливи піддаються постійним змінам своєї хімічної структури, тобто вони старіють. Швидкість старіння в значній мірі залежить від хімічного складу оливи, а також від тривалості впливу і рівня температур, діючих на оливу. Підсилюють старіння оливи різні забруднення, такі як вода, продукти зносу, іржа та пил. Шляхом додавання до складу оливи необхідних присадок виробник змащувальних матеріалів може ефективно діяти на регулювання та контролювання процесу старіння. Наслідки старіння проявляються в змінах в'язкості оливи, утворення коррозійно-агресивних кислот і відкладень. Виникаючі внаслідок старіння оливи відкладення можуть бути твердими як висохша фарба, м'якими як резина, в'язкими, як бруд, і можуть забивати маслопроводи, сопла вприску або фільтри. У результаті старіння масла знижуються демульгуючі і антипені властивості, знижується рівень захисту від зносу і корозії і, частково, знижуються властивості по сепарації повітря. Визначення характеристик старіння масла виробляється відповідно до норм ASTM D 2893. Синтетичні редуторні масла в порівнянних умовах експлуатації виявляються значно стійкішими до старіння, ніж мінеральні масла, завдяки чому досягаються більш тривалі інтервали заміни масла.

*Захист від корозії.* При оцінці характеристики захисту від корозії редуторних оливи порівнюють між такими показниками, як: захист від корозії сталі, захист від корозії міді (сумісність із кольоровими металами).

*Захист від корозії сталі.* Проникаюча в редутор ззовні або волога, що конденсується з повітря, при з'єднанні з киснем повітря призводить до утворення іржі на недостатньо захищених від корозії сталевих поверхнях.

Корозія поверхні працюючих компонентів, а також частинки іржі, що переносяться оливою, які знову надходять у місця контакту зубів шестерень або в підшипники і викликають абразивну дію, сприяють збільшенню зносу. Крім цього, утворення іржі негативно впливає на стійкість оливи до старіння, знижує демульгуючі властивості редуторних оливи і може сприяти утворенню шламу.

Щоб підвищити антикорозійні властивості, до складу редуторних оливи додають інгібітори корозії у вигляді полярних присадок, які завдяки щільному укриттю поверхні утворюють надійну водовідштовхувальну плівку, що захищає поверхню корозії. Перевірка редуторних оливи захисту сталі від корозії проводиться відповідно до норм ISO 7120.

*Захист від корозії міді (сумісність із кольоровими металами).* При використанні протизадирних присадок редуторні оливи також не повинні викликати корозію робочих поверхонь обладнання кольорових металів, особливо таких, як мідь або мідні сплави, наприклад бронза або латунь. Характеристики захисту від корозії перевіряються на мідних платівках відповідно до норм ISO 2160.

*Характеристики при низьких температурах.* В залежності від типу базового масла редуторні оливи загусають при низьких температурах або внаслідок все більшого підвищення в'язкості, або з-за кристалізації воску парафінової складової оливи.

В якості точки відрахування для характеристик текучості оливи при низьких температурах служить температура застигання, яка визначається відповідно до норм ISO 3016. В основі цих нормативів визначається найнижча температура, при якій олива ще має текучість, якщо вона охолоджується в визначених умовах випробування. Для забезпечення швидкого і достатнього обсягу змазування при холодному запуску обладнання сама низька температура оливи в редукторі, яка часто і є температура при запуску, повинна бути хоча б при кількох градусах вище температури застигання.

У порівнянні з мінеральними оливами синтетичні редукторні оливи мають набагато більш високі властивості текучості при низьких температурах. Завдяки високим індексам в'язкості (VI) синтетичні редукторні оливи при низьких температурах є більш текучими, ніж мінеральні масла при однаковій номінальній в'язкості. Їх температура застигання знаходиться значно нижче, а в деяких випадках досягає значення температури нижче  $-50^{\circ}\text{C}$  (табл. 3).

Таблиця 3

### Порівняння характеристик мінеральної та синтетичних олив при низьких температурах

Тип мастила	ISO VG ISO 3448	Індекс в'язкості ISO 2909	Точка застигання ISO 3016 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Мінеральна олива	220	$\geq 90$	$< -10^{\circ}\text{C}$
Поліальфаолефіни (ПАО)	220	$\geq 150$	$< -40^{\circ}\text{C}$
Полігліколи (ПГ)	220	$> 220$	$> -35^{\circ}\text{C}$

*Сумісність із внутрішніми лакофарбовими покриттями..* Корпуси редукторів із сірого чавуну або сталі, як правило, покриваються зсередини лакофарбовими покриттями, щоб захистити редуктори від корозії під час зберігання, транспортування або тривалого простого обладнання.

Часто використовувані склади ґрунтівки стійкі до впливу редукторних олив на мінеральній основі до температури  $100^{\circ}\text{C}$ . При більш високих температурах оливи ( $> 100^{\circ}\text{C}$ ) або при використанні синтетичних масел – особливо на полігліколевій основі – ці покриття не завжди стійкі до дії оливи. Це може призводити до розм'якшення або розчинення покриттів, а також до утворення здуття і, зрештою, відокремлення фарби від поверхні обладнання. Наслідком цього є виникнення пошкоджень обладнання або порушення виробничого процесу, наприклад, внаслідок закупорювання маслогонів, фільтрів або отворів для видалення повітря. Двокомпонентні лакофарбові покриття на основі епоксидних смол, навпаки, в основному добре стійкі до дії редукторних олив всіх типів, а також при високих робочих температурах. Проте перед серійним застосуванням бажано проводити тести на сумісність у виробника лакофарбових покриттів.

*Спінювання редукторних олій.* Редукторні оливи, з одного боку, повинні максимально швидко сепарувати бульбашки повітря в олії, а з іншого боку, запобігати утворенню стабільної поверхневої піни. Піна утворюється внаслідок зростання повітряних бульбашок, що виділяються з оливи та рухаються у напрямку поверхні. Для утримання процесу піноутворення на мінімальному рівні повітряні бульбашки повинні максимально швидко руйнуватися.

Процес піноутворення особливо характерний для редукторів із середньою та високою окружною швидкістю, в яких змащування шестерень проводиться зануренням у масляну ванну. Схильність до піноутворення підвищується внаслідок постійного припливу повітря на оливу. Забруднення, що потрапляють в оливу, такі як вода, пил, частинки іржі і продукти старіння можуть ще більше збільшити спінювання масла. Піноутворення значно знижує мастильні властивості оливи, такі як стійкість до старіння, тепловідведення та інші. Надмірне піноутворення може призводити до відведення піни у вентиляційні отвори; при змащуванні циркуляцією під тиском існує небезпека, що піна всмоктуватиметься масляним насосом, що може приводити до збільшення шуму під час роботи насосу або його пошкодження.

Зниження рівня піноутворення може досягатися шляхом додавання до складу оливи протипінних присадок, які, однак, при дуже високих концентраціях можуть знижувати властивості оливи по сепарації повітря. Визначення характеристики спінювання олив здійснюється відповідно до норм ISO 6247 чи ASTM D 892.

На сьогоднішній день все більше визнання отримує метод визначення характеристики спінювання за Флендером відповідно до норм ISO 12152. У цьому тесті пара шестерень обертається в маслі, внаслідок чого повітря змішується з олією. Потім масло перевіряється за такими показниками, як сприйняття повітря, утворення повітряно-олійної дисперсії, поверхнєве спінювання, а також подальше утворення відкладень.

*Сумісність із еластомерами.* Матеріали радіальних ущільнень валів і статичних ущільнень, таких як кільця ущільнювачів круглого перерізу, при характерних для роботи редуктора температурах не повинні пошкоджуватися при контакті з оливою або присадками, що знаходяться в ній, тобто. ставати крихкими або розм'якшуватися, щоб не знижувати своїх ущільнюючих властивостей. В іншому випадку передчасне зношування ущільнень веде до утворення протікань і виникаючими звідси витратами на очищення, що може привести до потенційно дорогого ремонту редуктора.

Зі зростанням переданої редуктором потужності, що призводить до підвищення робочих температур, а також при переведенні змащування редуктора з мінеральної на синтетичну оливу, особливо необхідно враховувати питання сумісності оливи з матеріалами ущільнень.

Для редукторних олив статична сумісність з еластомерами перевіряється відповідно до норм ISO 1817, а динамічна – за нормами DIN 3761 (табл. 4).

**Висновки.** У зв'язку з тим, що в'язкість сильно змінюється з температурою, залежність в'язкості оливи від температури визначається, як правило, індексом в'язкості. Чим вище індекс в'язкості редукторної оливи, тим менше її в'язкість змінюється при зміні температури і тим більш плоскою буде в'язкісно-температурна характеристика на діаграмі в'язкості залежно від температури. Ступінь зміни в'язкості під впливом температури залежить як від типу базової оливи, наприклад, мінеральної оливи, поліальфаолефінів, складних ефірів та полігліколів, так і від додаткових присадок, що покращують показник індексу в'язкості.

Синтетичні редукторні оливи, в порівняних умовах експлуатації, виявляються значно стійкішими до старіння, ніж мінеральні, завдяки чому досягаються триваліші інтервали заміни олив. Синтетичні редукторні оливи, внаслідок високих характеристик при холодному старті, особливо добре підходять для застосування в умовах дуже низьких температур.

Таблиця 4

## Огляд характеристик сумісності редукторних олив з матеріалами ущільнень

Скорочення	NBR	ASM	VQM	FKM	PTFEA
Тип	Акрілоніт-ріл-бутадієн-каучук	Акрілат-каучук	Силикон-каучук	Фтор-каучук Напр.вітон	Політетра-фторетиле н
Термостійкість	До 100°C	До 125°C	До 125°C	До 150°C	До 150°C
Мінеральна олива	Сумісно;	Сумісно	Сумісно з усіма типами олив, але є вплив на здатність до сепарації повітря	Мінеральні оливи можуть контактувати з ущільненнями і тільки до 125 °C	Мінеральні оливи можуть контактувати з ущільненнями тільки до 125 °C
Поліальфаолефіни (ПАО)	Сумісно	Сумісно	Сумісно з усіма типами олив, але є вплив на здатність до сепарації повітря	Сумісно	Сумісно;
Полігліколі (ПГ)	Сумісно;	не сумісно	Сумісно з усіма типами олив, але є вплив на здатність до сепарації повітря	Умовно сумісно	Мінеральні оливи можуть контактувати з ущільненнями тільки до 125 °C

## Список літератури

1. ISO 3016 : 2019 Petroleum and related products from natural or synthetic source – Determination of pour point.
2. ISO 6247 : 1998 Petroleum products – Determination of foaming character characteristics of labricating oils.
3. ISO 12152 : 2012 Lubricants, industrial oils and related products – Determination of foaming and air release. properties of industrial dear oils using a spur dear test rid – Flender foat test proctdure.
4. ISO 1817 : 2022 Rubber, vulcanired or thertoplastik – Determination of the effect of liquids.
5. ISO 7120 : 1987 Petroleum products and lubricants – petroleum oils and other fluids – Determination of rust-preventing characteristics in the presence of water.
6. ISO 2160 : 1998 Petroleum products – Corrosiveness to copper – Copper strip test.

Стаття надійшла до редакції 31.08.2023.



**Кіндрачук Мирослав Васильович** – докт. техн. наук, член-кореспондент НАН України, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м. Київ Україна, nau12@ukr.net. <https://orsid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Мельник Володимир Борисович** – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м. Київ Україна, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>.

**Леусенко Дар'я Володимирівна** – аспірантка кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м. Київ, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>.

**Герасимов Володимир Олегович** – студент кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м. Київ Україна.

---

M. KINDRACHUK, V. MELNYK, D. LEUSENKO, V. HERASYMOV

### **SELECTION OF GEAR OILS BY PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS**

A comparative analysis of the performance of mineral and synthetic gear oils according to the main (standard) physical and chemical characteristics was carried out. The main requirements for gear oils, which are formulated today by leading gear manufacturers and are reflected in international specifications and standards, are given. Conclusions were made regarding the compatibility of mineral and synthetic gear oils.

**Key words:** mineral and synthetic gear oils, physical and chemical characteristics, operating temperature range, resistance to aging, corrosion protection, compatibility with elastomers, viscosity.

#### **References**

1. ISO 3016 : 2019 Petroleum and related products from natural or synthetic source – Determination of pour point
2. ISO 6247 : 1998 Petroleum products – Determination of foaming character characteristics of lubricating oils.
3. ISO 12152 : 2012 Lubricants, industrial oils and related products – Determination of foaming and air release. properties of industrial gear oils using a spur gear test rig – Flender foat test procedure.
4. ISO 1817 : 2022 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of the effect of liquids.
5. ISO 7120 : 1987 Petroleum products and lubricants – petroleum oils and other fluids – Determination of rust-preventing characteristics in the presence of water.
6. ISO 2160 : 1998 Petroleum products - Corrosiveness to copper – Copper strip test.

**Kindrachuk Myroslav Vasyliovych** – Dr. Tech. Sciences, corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, professor Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Melnyk Volodymyr Borysovyh** – candidate of technical. of Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0003-4379-654X>.

**Daria Volodymyrivna Leusenko** is a graduate student at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-8024-6104>.

**Volodymyr Olehovych Herasymov** – student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, nau12@ukr.net. <https://orcid.org/0009-0005-4167-7629>.