

УДК 621.831.004.55

DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18077

В. Б. МЕЛЬНИК, Д. В. ЛЕУСЕНКО, Б. М. МАМАЙ

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МАСЛЯНОЇ ДІЇ ОЛИВ З КАРБОНОФТОРИДНИМИ ПРИСАДКАМИ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ ТЕРТЯ

*Викладено результати дослідження впливу карбонофторидних присадок на мастильну дію авіаційних олив ВНШНП-50-1-4у, ІПМ-10; МС-8п, індустриальних олив І-20А, ІПП-18 та автомобільної оливи М-10Г<sub>2</sub>К при нестационарних режимах тертя. Введення присадки КФ у мастильні середовища значно зменшує, а в окремих випадках повністю усуває тимчасове погіршення мастильної дії при нестационарних режимах за рахунок високих адсорбційних властивостей та хімічної активності карбонофторидів. За допомогою розробленої програми визначено області найбільш ефективного використання олив з КФ-присадками за інтегрованим показником ефективності масляної дії.*

**Ключові слова:** ефективність масляної дії, карбонофторидні присадки, оливи, нестационарний режим тертя, тимчасове погіршення мастильної дії (ТПМД), товщина мастильного шару, інтегрований показник.

**Постановка проблеми.** Нестационарні режими роботи значно впливають на працездатність і економічність пар тертя. Загальновідомо, що нестационарні режими викликають найбільше зношування [1;2], проте здатність мастильних середовищ протистояти цьому поки що не оцінюється, невідомо навіть чи пов'язано збільшення зносу з властивостями мастильного середовища, чи можна вибором мастильних середовищ його зменшити.

Як встановлено проведеними дослідженнями, однією з основних причин підвищеного зносу при нестационарному режимі є тимчасове погіршення мастильної дії (ТПМД), викликане зміною граничних процесів, що протікають - руйнуванням спочатку сформованих фізично адсорбованих і формуванням більш стійких хемосорбційних шарів [3; 4]. Подібний ефект зменшення кількості адсорбованого на поверхні матеріалу за нестационарних умов встановлений дослідженнями з фізико-хімії твердого тіла [5; 6].

Експерименти показали, що зростання за нестационарних умов тертя інтенсивності зношування корелює з інтенсивністю ТПМД. Небезпека ТПМД (у деяких випадках може призвести до пошкодження вузла тертя) визначається видом нестационарності, показниками режиму роботи та найбільшою мірою властивостями мастильних середовищ.

Розроблено метод оцінювання ТПМД за результатами вимірювання товщини мастильного шару. Метод заснований на тому, що змащувальні властивості рідких середовищ при нестационарних умовах визначаються ступенем тимчасового зменшення товщини мастильного шару і тривалістю цього зменшення [7].

Великий вплив на ТПМД, крім вуглеводневого складу оливо, надають присадки. Присадки можуть як згладжувати ТПМД, так і посилювати його. Тому правильний підбір присадок для оливо, що працюють у нестационарних умовах, має винятково важливе значення.

Особливу увагу останнім часом викликають фторвуглецеві сполуки (карбонфторид, фторований вуглець, фторграфіт, полімонофторид вуглецю) як ефективні присадки до мастильних середовищ, здатні модифікувати поверхні пар тертя з метою підвищення їх антифрикційних та протизносних властивостей. Відповідно до сучасних уявлень [8; 9; 10; 11] частинки карбонфторидів (КФ) утворюються в результаті хімічної реакції графіту і вільного фтору при температурі 420 °С, мають кристалічну структуру, що утворюється рівноважними шарами атомів вуглецю і фтору, який розташований між вуглецевими шарами і пов'язаний з атомами вуглецю ковалентними зв'язками. Відстань між атомами вуглецю С - С становить 1,41-1,47Å, міжшарову відстань - 5,7 - 11,2Å, граничне насичення фтором (у масових частках) досягає 66,6%, температура розкладання Тразл = 583 ... 753 °К, щільність  $\rho = 2,35 \dots 2,68 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Оптимальні за розмірами частинки порядку 10 ... 100 шарів, а в стані поставки частинки більше 50 ... 100 мкм, при цьому КФ, що поставляється хімічно інертний, так як, енергія зв'язку С-Ф дуже висока (500 кДж / моль), внаслідок чого частинки пасивуються при приєднання частинок середовища та газів. У зоні тертя відбувається диспергування КФ із утворенням активних радикалів здатних вступити у міцний хімічний зв'язок з атомами металу на поверхні тертя.

Модифікація поверхонь тертя за допомогою КФ-присадок має ряд переваг у порівнянні з відомими:

- при взаємодії з металами (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub> забезпечує утворення зв'язків металевого типу, що зміцнює матеріал поверхневого шару;
- модифікований (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub> шар матеріалу має велику термостійкість у порівнянні з модифікацією іншими матеріалами, у тому числі органічними;
- при терті протікають активні трибохімічні реакції за участю фтору, який пригнічує дію кисню.

**Методика дослідження.** Дослідження впливу КФ-присадок на мастильну дію масляних середовищ при нестационарних режимах тертя виконувалося в умовах лінійного локального контакту при коченні з просковзанням циліндричних зразків на модернізованій машині тертя СМЦ-1, що дозволяє багаторазово проводити запуск, роботу з постійною частотою та гальмування за заданими параметрами - навантаження, швидкості та часу кожного циклу [12].

Умови випробувань моделювали умови зачеплення зубів зубчастих передач. Під час випробувань реєструвалися: – частота обертання; пусковий і встановлений момент тертя; товщина мастильного шару після виходу на частоту обертання, що встановилася (сумарна товщина гідродинамічної та граничної складових мастильного шару); товщина мастильного шару на стоянці (товщина твердоподібних самогенеруючих органічних плівок СОП) [13]; температура середовища.

Випробовувалися такі мастильні середовища:

- авіаційні оливи ВНШНП-50-1-4у; ПМ-10; МС-8п;
- індустриальні оливи І-20А; ЦП-18;
- автомобільне масло М-10Г<sub>2</sub>К.

Мастильні середовища випробовувалися в однаковому нестационарному режимі (пуски-зупинки), без присадок та з присадками карбонофторидів (ТУ 6:-02-2-859-85) у концентрації: 0,125; 0,25; 0,5; 1% (масових часток). Обсяг випробуваного середовища – 100 мл.

Умови випробувань: контактна напруга – 700 МПа, прослизання – 20 %, сумарна швидкість кочення – 4,23 м/с, матеріал роликів – ст. 40Х, твердість HRC 30 - 32, шорсткість Ra - 0,3 мкм. Режим нестационарності: розгін до заданої швидкості (4,23 м/с) протягом 3 с, робота з постійною швидкістю – 10 с, гальмування – 3 с, стоянка – 5 с. Цикли розгін - встановлений режим - гальмування - стоянка слідує один за одним без перерви протягом 2 год.

На рис. 1 показані типові криві зміни сумарної товщини мастильного шару (крива 1), товщини самогенеруючої органічної плівки (крива 2) та моменту тертя (крива 3) за нестационарних умов за весь час експерименту. На рис. 2 представлені осцилограми зміни цих параметрів за один цикл на початку експерименту і після припрацювання.

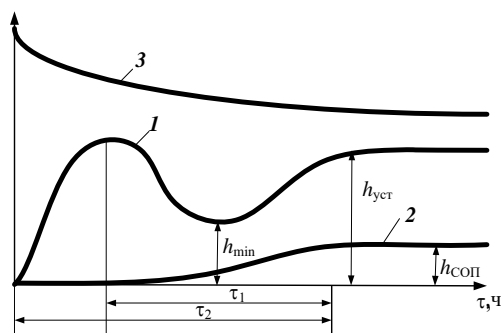


Рис. 1. Типові криві зміни в часі сумарної товщини мастильного шару (1), товщини самогенеруючої органічної плівки (2) та моменту тертя (3) за нестационарних умов [18 ]



Рис. 2. Осцилограми зміни моменту тертя (2), та сумарної товщини мастильного шару (1) 1,2 - олива без КФ-присадок; 1'2' - олива з КФ-присадками [18]

Як основні критерії оцінки ефективності мастильної дії при нестационарних умовах тертя запропоновані (таблиця 1):

- $\tau_1$  - тривалість зменшення товщини мастильного шару при ТПМД;  
 $h_{\min}$  - мінімальна товщина мастильного шару при ТПМД;  
 $h_{\text{уст}}$  - товщина мастильного шару, що встановилася після приробітку;  
 $h_{\text{соп}}$  - товщина твердоподібних СОП;  
 $\tau_2$  - час до стабілізації параметрів тертя (час припрацювання);  
 $f_n$  - коефіцієнт тертя при запуску;  $f_1$  - коефіцієнт тертя, що встановився;  
 $\Delta T$  - збільшення температури мастильного середовища; I - знос.

Таблиця 1.

## Вплив концентрації КФ-присадок на основні показники мастильної дії [18]

| Маслило        | Концентрація КФ, % | Основні показники мастильної дії |                    |                      |                            |                            |       |                  |                    |            | Інтегр-й показник ефективності масляної дії $Q$ |
|----------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|-------|------------------|--------------------|------------|---|
|                |                    | $\tau_1$ ,<br>мин.               | $\tau_2$ ,<br>мин. | $h_{\min}$ ,<br>мкм. | $h_{\text{уст}}$ ,<br>мкм. | $h_{\text{соп}}$ ,<br>мкм. | $f_n$ | $f_{\text{уст}}$ | $\Delta T$ ,<br>°C | I,<br>мкм. |   |
| ВНИИПІ 50-1-4к | 0                  | 55                               | 90                 | 0,7                  | 0,95                       | 0,3                        | 0,38  | 0,22             | 22                 | 2,5        | 169   |
|                | 0,1                | 45                               | 90                 | 0,65                 | 0,85                       | 0,12                       | 0,38  | 0,22             | 20                 | 2,8        | 157   |
|                | 0,25               | 30                               | 35                 | 0,8                  | 0,9                        | 0,15                       | 0,33  | 0,17             | 12                 | 0,75       | 77  |
|                | 0,5                | 30                               | 50                 | 0,85                 | 0,95                       | 0,475                      | 0,31  | 0,18             | 14                 | 0,47       | 94  |
|                | 1                  | 40                               | 100                | 0,9                  | 1                          | 0,25                       | 0,37  | 0,23             | 15                 | 0,65       | 156   |
| ПМ-10          | 0                  | 20                               | 70                 | 1,2                  | 1,25                       | 0,41                       | 0,41  | 0,26             | 16                 | 0,69       | 108   |
|                | 0,1                | 30                               | 40                 | 0,8                  | 0,9                        | 0,45                       | 0,34  | 0,15             | 12                 | 0,8        | 82  |
|                | 0,25               | 50                               | 60                 | 0,7                  | 0,9                        | 0,56                       | 0,38  | 0,21             | 11                 | 0,75       | 121   |
|                | 0,5                | 20                               | 30                 | 0,85                 | 0,9                        | 0,65                       | 0,34  | 0,19             | 16                 | 1,74       | 67  |
|                | 1                  | 30                               | 85                 | 0,8                  | 0,85                       | 0,45                       | 0,34  | 0,19             | 13                 | 1,1        | 129   |
| МС-8п          | 0                  | 5                                | 20                 | 1,05                 | 1,4                        | 0,71                       | 0,36  | 0,23             | 21                 | 1,28       | 49  |
|                | 0,1                | 50                               | 60                 | 0,85                 | 1,1                        | 0,64                       | 0,34  | 0,21             | 22                 | 1,2        | 134   |
|                | 0,25               | 20                               | 30                 | 0,9                  | 1,15                       | 0,64                       | 0,33  | 0,2              | 20                 | 0,75       | 71  |
|                | 0,5                | 10                               | 30                 | 0,9                  | 1,2                        | 0,62                       | 0,32  | 0,2              | 21                 | 1          | 63  |
|                | 1                  | 10                               | 30                 | 0,75                 | 1,2                        | 0,51                       | 0,32  | 0,2              | 18                 | 0,9        | 59  |
| И-20А          | 0                  | 90                               | 90                 | 0,4                  | 1                          | 0,25                       | 0,32  | 0,19             | 21                 | 1,44       | 203   |
|                | 0,1                | 20                               | 85                 | 0,9                  | 1                          | 0,07                       | 0,32  | 0,19             | 16                 | 0,34       | 122   |
|                | 0,25               | 50                               | 85                 | 0,9                  | 0,95                       | 0,25                       | 0,34  | 0,2              | 15                 | 1          | 151   |
|                | 0,5                | 45                               | 55                 | 0,25                 | 0,55                       | 0,08                       | 0,36  | 0,2              | 17                 | 0,4        | 117   |
|                | 1                  | 20                               | 20                 | 0,25                 | 0,6                        | 0,08                       | 0,33  | 0,2              | 15                 | 1,31       | 56  |
| ИГП-18         | 0                  | 10                               | 110                | 0,8                  | 1                          | 0,1                        | 0,32  | 0,2              | 17                 | 0,65       | 138   |
|                | 0,1                | 15                               | 80                 | 0,55                 | 0,65                       | 0,05                       | 0,32  | 0,2              | 23                 | 0,7        | 118   |
|                | 0,25               | -                                | 5                  | 0,65                 | 0,65                       | 0,45                       | 0,32  | 0,2              | 21                 | 0,85       | 26  |
|                | 0,5                | 15                               | 30                 | 0,65                 | 0,75                       | 0,05                       | 0,33  | 0,17             | 21                 | 0,6        | 66  |
|                | 1                  | -                                | 10                 | 0,65                 | 0,6                        | 0,05                       | 0,31  | 0,2              | 22                 | 0,75       | 32  |
| М-10Г К        | 0                  | 25                               | 50                 | 0,45                 | 0,55                       | 0,05                       | 0,33  | 0,17             | 23                 | 0,4        | 98  |
|                | 0,1                | 20                               | 50                 | 0,65                 | 0,95                       | 0,28                       | 0,34  | 0,15             | 18                 | 0,42       | 88  |
|                | 0,25               | 20                               | 40                 | 1                    | 1,05                       | 0,15                       | 0,31  | 0,17             | 21                 | 0,43       | 83  |
|                | 0,5                | 20                               | 85                 | 0,9                  | 1,1                        | 0,125                      | 0,35  | 0,19             | 22                 | 0,56       | 123   |
|                | 1                  | 20                               | 40                 | 0,85                 | 1,05                       | 0,08                       | 0,341 | 0,18             | 22                 | 0,44       | 83  |

Розрахунок кількісного показника ефективності мастильної дії олів з карбонофторидними присадками при нестаціонарних режимах тертя проводиться за Формулою (1):

Формула (1)

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m v_{ik} * P_{ik}$$

де  $v_{ik}$  - ваговий коефіцієнт показника, що відображає його важливість;

$P_{ik}$  – одиничні показники, які забезпечують якість (кожний з вказаних показників оцінюється за 5-бальною шкалою);

$n$  – кількість груп показників;

$m$  – кількість одиничних показників у кожній групі.

Комплекс показників ефективності мастильної дії 6 олів карбонофторидними присадками 5 різних концентрацій при нестаціонарних режимах тертя за 9 групами показників якості і 45 одиничними показниками зформовано у вигляді матриці.

$$P := \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} & P_{18} & P_{19} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} & P_{28} & P_{29} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} & P_{38} & P_{39} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} & P_{48} & P_{49} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} & P_{58} & P_{59} \end{pmatrix}$$

Рис 3. Матриця показників якості

$V$  – ваговий коефіцієнт взято від 1 до 5. (Таблиця 2)

Таблиця 2.

### Ваговий коефіцієнт

| Ваговий коефіцієнт | Вагомість             |
|--------------------|-----------------------|
| 1                  | Надзвичайно важливо   |
| 2                  | Дуже важливо          |
| 3                  | Важливо               |
| 4                  | З помірною важливістю |
| 5                  | Мало важливо          |

## Розробка програми

```
public class MatrixCalculationGUI {
public static void main(String[] args) {

    double[][] matrixA1 = {
        {55, 90, 0.7, 0.95, 0.3, 0.38, 0.22, 22, 2.5},
        {45, 90, 0.65, 0.85, 0.12, 0.38, 0.22, 20,
2.8},
        {30, 35, 0.8, 0.9, 0.15, 0.33, 0.17, 12, 0.75},
        {30, 50, 0.85, 0.95, 0.47, 0.31, 0.18, 14,
0.47},
        {40, 100, 0.9, 1, 0.25, 0.37, 0.23, 15, 0.65}
    };

    double[][] matrixA1_1 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };

    double[][] matrixA2 = {
        {20, 70, 1.2, 1.25, 0.41, 0.41, 0.26, 16,
0.69},
        {30, 40, 0.8, 0.9, 0.45, 0.34, 0.15, 12, 0.8},
        {50, 60, 0.7, 0.9, 0.56, 0.38, 0.21, 11, 0.75},
        {20, 30, 0.85, 0.9, 0.65, 0.34, 0.19, 16,
1.74},
        {30, 85, 0.8, 0.85, 0.45, 0.34, 0.19, 13, 1.1}
    };

    double[][] matrixA2_2 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };

    double[][] matrixA3 = {
        {5, 20, 1.05, 1.4, 0.71, 0.36, 0.23, 21, 1.28},
        {50, 60, 0.85, 1.1, 0.64, 0.34, 0.21, 22, 1.2},
        {20, 30, 0.9, 1.15, 0.64, 0.33, 0.2, 20, 0.75},
        {10, 30, 0.9, 1.2, 0.62, 0.32, 0.2, 21, 1},
        {10, 30, 0.75, 1.2, 0.51, 0.32, 0.2, 18, 0.9}
    };

    double[][] matrixA3_3 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
```

```
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

double[][] matrixA4 = {
{90, 90, 0.4, 1, 0.25, 0.32, 0.19, 21, 1.44},
{20, 85, 0.9, 1, 0.07, 0.32, 0.19, 16, 0.34},
{50, 85, 0.9, 0.95, 0.25, 0.34, 0.2, 15, 1},
{45, 55, 0.25, 0.55, 0.08, 0.36, 0.2, 17, 0.4},
{20, 20, 0.25, 0.6, 0.08, 0.33, 0.2, 15, 1.31}
};

double[][] matrixA4_4 = {
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

double[][] matrixA5 = {
{10, 110, 0.8, 1, 0.1, 0.32, 0.2, 17, 0.65},
{15, 80, 0.55, 0.65, 0.05, 0.32, 0.2, 23, 0.7},
{0, 5, 0.65, 0.65, 0.45, 0.32, 0.2, 21, 0.85},
{15, 30, 0.65, 0.75, 0.05, 0.33, 0.17, 21,
0.6},
{0, 10, 0.65, 0.6, 0.05, 0.31, 0.2, 22, 0.75}
};

double[][] matrixA5_5 = {
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

double[][] matrixA6 = {
{25, 50, 0.45, 0.55, 0.05, 0.33, 0.17, 23,
0.4},
{20, 50, 0.65, 0.95, 0.28, 0.34, 0.15, 18,
0.42},
{20, 40, 1, 1.05, 0.15, 0.31, 0.17, 21, 0.43},
{20, 85, 0.9, 1.1, 0.125, 0.35, 0.19, 22,
0.56},
{20, 40, 0.85, 1.05, 0.08, 0.341, 0.18, 22,
0.44}
};

double[][] matrixA6_6 = {
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
```

```
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };
    String[] matrixNames = {
        "КФ - 0%",
        "КФ - 0.1%",
        "КФ - 0.25%",
        "КФ - 0.5%",
        "КФ - 1%"
    };

    double[][][] matricesP = {matrixA1, matrixA2, matrixA3,
matrixA4, matrixA5, matrixA6};
    double[][][] matricesV = {matrixA1_1, matrixA2_2,
matrixA3_3, matrixA4_4, matrixA5_5, matrixA6_6};
    int[] totalSums = new int[matricesP.length];

    for (int k = 0; k < matricesP.length; k++) {
        double[][] currentMatrixP = matricesP[k];
        double[][] currentMatrixV = matricesV[k];

        int numRowsP = currentMatrixP.length;
        int numRowsV = currentMatrixV.length;
        int[] rowSums = new int[numRowsP];

        if (numRowsP != numRowsV) {
            System.out.println("Матриці мають різну кількість
рядків, множення неможливе.");
            return;
        }

        int totalSum = 0;

        for (int i = 0; i < numRowsP; i++) {
            int rowSum = 0;
            for (int j = 0; j < currentMatrixP[i].length; j++)
            {
                rowSum += currentMatrixP[i][j] *
currentMatrixV[i][j];
            }
            System.out.println(matrixNames[i] + ": " + rowSum);
            rowSums[i] = rowSum;
            totalSum += rowSum;
        }

        totalSums[k] = totalSum;
        System.out.println("Кількісне значення " + (k + 1) + ":
" + totalSum);
        System.out.println();
    }

    int maxSum1 = totalSums[0];
    int minSum1 = totalSums[0];
    int maxSumIndex = 0;
    int minSumIndex = 0;
```



```
for (int i = 1; i < totalSums.length; i++) {
    int sum = totalSums[i];
    if (sum > maxSum1) {
        maxSum1 = sum;
        maxSumIndex = i;
    }
    if (sum < minSum1) {
        minSum1 = sum;
        minSumIndex = i;
    }
}

System.out.println("Найбільший кількісний показник якості
мастила: " + maxSum1 + " (Належить мастилу " + (maxSumIndex +
1) + ")");
System.out.println("Найменший кількісний показник якості
мастила: " + minSum1 + " (Належить мастилу " + (minSumIndex +
1) + ")");
}
```

В цій програмі описано:

1. MatrixA1, MatrixA2, MatrixA3, MatrixA4, MatrixA5, MatrixA6 – основні оціночні показники мастильної дії згідно Таблиці 1, де:
  - матриця MatrixA1 заповнена даними оливи ВНИИ НП 50-1-4у
  - матриця MatrixA2 заповнена даними оливи ППМ-10
  - матриця MatrixA3 заповнена даними оливи МС-8п
  - матриця MatrixA4 заповнена даними оливи І-20А
  - матриця MatrixA5 заповнена даними оливи ІПП-18
  - матриця MatrixA6 заповнена даними оливи М-10Г<sub>2</sub> К
2. MatrixA1\_1, MatrixA2\_2, MatrixA3\_3, MatrixA4\_4, MatrixA5\_5, MatrixA6\_6 – ваговий коефіцієнт, який в нашому випадку заданий як одиниця і однаковий для всіх показників.
3. За Формулою 1, проведено розрахунки кількісних показників кожного коефіцієнту концентрації присадки (0%, 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%). Де значення  $P_{ik}$  взяте з матриць: MatrixA1, MatrixA2, MatrixA3, MatrixA4, MatrixA5, MatrixA6, а значення  $v_{ik}$  з матриць: MatrixA1\_1, MatrixA2\_2, MatrixA3\_3, MatrixA4\_4, MatrixA5\_5, MatrixA6\_6 відповідно.
4. Після опрацювання результатів дослідження за цією програмою ми отримуємо інтегрований показник ефективності масляної дії Q (Таблиця 1).

**Результати дослідження.** Аналіз результатів випробувань шести марок масел, наведених у таблиці, показує, що ефективність впливу КФ-присадок на мастильну дію при нестационарних умовах тертя залежить від базового мастильного середовища і концентрації присадки, що вводиться.

Так, наприклад, високоякісні авіаційні масла МС-8п і ППМ-10, що володіють гарною мастильною дією на встановленому режимі, добре працювали і при нестационарних умовах: при ТПМД товщина мастильного шару не зменшувалася

нижче 1 мкм і протягом усього експерименту інтенсивно утворювалися СОП (товщина СОП 0,71 і 0,41 мкм відповідно).

Застосування КФ-присадок у цих оліях неефективне, а при деяких концентраціях може призвести до погіршення основних показників дії мастила.

Введення в мастильний матеріал присадки КФ призводить, під впливом тих же умов контакту, до утворення фази FeF в поверхневому шарі металу і хемосорбованих шарів CF<sub>2</sub> і CF<sub>3</sub> на поверхнях тертя. Експерименти показали, що ці хемосорбовані плівки, як і СОП, мають високі протизносні характеристики [13; 17].

З шести випробуваних мастил найбільш інтенсивно утворювали СОП авіаційні масла МС-8П, ПММ-10, ВНДІ НП-50-1-4У (товщина СОП - 0,71; 0,41; 0,3 мкм відповідно). Ці масла при нестационарному режимі тертя показали найменшу величину ТПМД (мінімальна товщина шару – 1,05; 1,0; 0,7 мкм). Індустріальні олії І-20А, ІПП-18 та автомобільна олія М-10Г<sub>2</sub>К значно гірше утворювали СОП (товщина відповідно – 0,25; 0,1 та 0,05 мкм).

Введення присадок КФ у випробувані за даних режимах авіаційні оливи не призвело до відчутного поліпшення мастильної дії. При введенні цих присадок навіть у малій концентрації в оливі І-20А, ІПП-18, М-10Г<sub>2</sub>К змащувальна дія покращувалася. Наприклад, якщо масова частка присадки КФ становить 0,125% маслі М-10Г<sub>2</sub>К товщина твердоподібної плівки зростає в 3 рази, а мінімальна товщина шару при ТПМД збільшується з 0,45 до 0,65 мкм.

**Висновки.** За розробленими критеріями оцінено ефективність мастильної дії шести марок масел з КФ-присадками при нестационарних режимах тертя. Ефективність застосування КФ-присадок залежить від властивостей базової олії та їх концентрації. Для випробуваних масел різного складу та призначення оптимальна масова частка присадки становила 0,25 – 0,5 %. У зв'язку з тим, що компоненти масел можуть конкурувати з КФ-присадками та перешкоджати утворенню ними твердоподібних плівок, доцільно застосовувати КФ-присадки в умовах слабого утворення СОП.

Введення присадки КФ у мастильні середовища значно зменшує, а в окремих випадках повністю усуває ТПМД при нестационарних режимах за рахунок високих адсорбційних властивостей та хімічної активності карбонофторидів. Розроблена програма оцінки ефективності масляної дії оливи з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя за інтегрованим показником ефективності масляної дії Q є дієвим інструментом для визначення областей для поліпшень та для відстеження ефективності масляної дії оливи з присадками при нестационарних режимах тертя

### Список літератури

1. Канарчук Е. А., Канарчук В. Е. Влияние режимов работы на износ двигателей внутреннего сгорания. К.: Наук. думка, 1970. – 312 с.
2. Калиновский М., Недель Р. Пусковой износ двигателей // Автомоб. пром-ть США. – Т.128, №4. – 1963. – С. 2 – 4.

3. Райко М. В., Мнацаканов Р. Г., Дмитриченко Н. Ф., Мельник В. Б. Смазочное действие и изнашивание в условиях часто повторяющихся пусков // Механизация и электрификация сельского хозяйства». – К., Урожай, 1985. – Вып. 61. – С. 78 – 82.
4. Райко М. В., Мнацаканов Р. Г., Мельник В. Б. Повышение работоспособности узлов трения с локальным контактом при неустановившихся режимах работы путем оптимизации процессов смазочного действия. // Всесоюз. науч.-техн. конф. «Обеспечение надежности узлов трения машин»: Тезисы докл. (Ворошиловград, 1988), – Ворошиловград: Ворошиловград-ский машиностроительный ин-т – 71 с.
5. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. ОГИЗ, – М.: Гостехиздат, 1947. 552 с.
6. Морисон С. Химическая физика поверхности твердого тела: М.: Мир, 1980. 488 с.
7. А. с. СССР №1536263. Способ оценки смазывающих свойств смазочных материалов для пары трения / Р. Г. Мнацаканов, М. В. Райко, В. Б. Мельник и др. – Заявл. 29.02.88; Оpubл. 15.01.90, БИ№2. – 4 с.
8. Fusaro R. L., Sliney H. E. Graphite fluoride (CF<sub>x</sub>)n a new solid lubricant. ASLE Transactions, 1970. V.13. – P. 56 – 65.
9. Gisser H., Petronio M., Shapiro A, Graphite fluoride as a solid lubricant. Lubrication Engineering, 1972. V.28. – №5. – P. 161 – 164.
10. Повышение долговечности узлов трения путем применения карбонофторидов. / Н. Д. Кузнецов, Д. Г. Громаковский, Л. И. Куксенова, и др. // Вестн. машиностроения, 1987. – №8. – С. 13 – 16.
11. Мельник В. Б., Громаковский Д. Г., Білякович О. М. Механізм мастильної дії карбонофторидних присадок // Міжнар. НТК «Вдосконалення конструктивних та експлуатаційних параметрів автомобілів і машин», (Київ, 1995): Тези доп. – К.: Транспортна академія України – 95 с.
12. Райко М. В., Мнацаканов Р. Г., Дмитриченко Н. Ф. Установка для исследования процессов трения, изнашивания и смазки при запуске и остановке // Совершенствование ремонта авиационной техники. – К.: КИИГА, 1983. – С. 37 – 39.
13. А. с. СССР №1718031. Способ оценки смазывающих свойств масел / В. Б. Мельник, М. В. Райко, В. В. Тыркаев – Заявл. 05.02.90; Оpubл. 07.03.92, БИ №9. – 3 с.
14. Райко М. В. Смазка зубчатых передач. – К.: Техніка, 1970. – 196 с.
15. Райко М. В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. – К., КИИГА, 1974. – 369 с.
16. Кадомский В. П. Исследование смазочных слоев и твердо-пластичных пленок, образующихся в контакте деталей при качении со скольжением: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – К., КИИГА, 1971. – 140 с.
17. Atkinson I. B., Waghoxne R. M. The Tribochemistry of Graphite Fluoride Studied Using XPS, Wear, 37, –1978. – P. 123 – 128.
18. Мельник В.Б. Смазочное действие масел с карбонофторидными присадками при нестационарных режимах трения /В.Б.Мельник, Р.Г.Мнацаканов, В.П.Федына // Проблемы тертя та зношування. – 2007. -№47. С. 249-258.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2023.

**Мельник Володимир Борисович** – канд. техн. наук, доцент, 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>.

**Мамай Богдан Миколайович** – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка», освітньо-професійна програма «Якість, стандартизація та сертифікація» Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м.Київ,Україна, 03058, Email: [b909mamay@gmail.com](mailto:b909mamay@gmail.com)

V. B. MELNYK, D. V. LEUSENKO, B. M. MAMAI

## EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE LUBRICATION OF OILS WITH CARBONFLUORIDE ADDITIVES IN NON-STATIONARY FRICTION REGIMES

The results of the study of the effect of carbonofluoride additives on the lubricating effect of aviation oils VNIINP-50-1-4u, IPM-10 are presented; MS-8p, industrial oils I-20A, IGP-18 and automotive oil M-10G2K in non-stationary friction modes. The introduction of KF additives into lubricating media significantly reduces, and in some cases completely eliminates, the temporary deterioration of the lubricating effect in non-stationary modes due to the high adsorption properties and chemical activity of carbonofluorides.

**Key words:** effectiveness of oil action, carbonofluoride additives, oils, non-stationary mode of friction, temporary deterioration of lubricating action (TPMD), thickness of the lubricating layer, integrated indicator.

### References

1. Kanarchuk E. A., Kanarchuk V. E. Influence of work modes on wear of internal combustion engines. K.: Science. dumka, 1970. - 312 p.
2. Kalinovsky M., Nedel R. Starting wear of engines // Avtomob. industry of the USA. - Vol. 128, No. 4. - 1963. - P. 2 - 4.
3. Raiko M.V., Mnatsakanov R.G., Dmytrychenko N.F., Melnyk V.B. Lubricating action and wear in the conditions of frequently repeated starts // Mechanization and electrification of agriculture". - K., Urozhai, 1985. - Vol. 61. – P. 78 – 82.
4. Raiko M.V., Mnatsakanov R.G., Melnyk V.B. Increasing the performance of friction units with local contact under unstable operating modes by optimizing the processes of lubrication action. // All Union. scientific and technical conf. "Ensuring the reliability of friction units of machines": Theses add. (Voroshilovgrad, 1988), - Voroshilovgrad: Voroshilovgrad-sky mashinostroitelnyy in-t - 71 p.
5. Adam N.K. Physics and chemistry of surfaces. OGIZ, - M.: Gostekhizdat, 1947. - 552 p.
6. Morrison S. Chemical physics of the surface of a solid body: Moscow: Mir, 1980. – 488 p.
7. A. p. USSR No. 1536263. A method of assessing the lubricating properties of lubricants for friction pairs / R. G. Mnatsakanov, M. V. Raiko, V. B. Melnyk, etc. - Appl. 29.02.88; Publ. 15.01.90, BI#2. - 4 s.
8. Fusaro R. L., Sliney H. E. Graphite fluoride (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub> a new solid lubricant. ASLE Transactions, 1970. V.13. - R. 56 - 65.
9. Gisser H., Petronio M., Shapiro A, Graphite fluoride as a solid lubricant. Lubrication Engineering, 1972. V.28. – #5. – P. 161 – 164.
10. Increasing the durability of friction nodes by applying carbon fluorides. / N. D. Kuznetsov, D. G. Gromakovsky, L. I. Kuksenova, and others // Vestn. machine engineering, 1987. - No. 8. – P. 13 – 16.
11. Melnyk V.B., Gromakovsky D.G., Bilyakovich O.M. The mechanism of the lubricating effect of carbonofluoride additives // Interna. NTK "Improvement of structural and operational parameters of cars and machines", (Kyiv, 1995): Abstracts of add. - K.: Transport Academy of Ukraine - 95 p.

- 
12. Raiko M.V., Mnatsakanov R.G., Dmytrychenko N.F. Installation for the study of friction, wear and lubrication processes during startup and shutdown // Improvement of aircraft repair. - K.: KIIGA, 1983. - P. 37 - 39.
  13. A. p. USSR No. 1718031. A method of evaluating the lubricating properties of oils / V.B. Melnyk, M.V. Raiko, V.V. Tyrkaev - Appl. 05.02.90; Publ. 03/07/92, BI #9. - 3 s.
  14. Raiko M.V. Lubrication of gears. - K.: Technika, 1970. - 196 p.
  15. Rayko M. V. Lubricating action of petroleum oils in the conditions of gear work: Diss. Dr. Tech. Sciences: 05.02.04. - K., KIIGA, 1974. - 369 p.
  16. Kadomskii V.P. Investigation of lubricating layers and hard-plastic films formed in the contact of parts during rolling with sliding: Diss. ... candidate technical Sciences: 05.02.04. - K., KIIGA, 1971. - 140 p.
  17. Atkinson I. B., Waghoxne R. M. The Tribochemistry of Graphite Fluoride Studied Using XPS, *Wear*, 37, -1978. - R. 123 - 128.
  18. Melnyk V.B. Lubricating effect of oils with carbonofluoride additives in non-stationary modes of friction / V. B. Melnyk, R. G. Mnatsakanov, V. P. Fedyna // *Problems of friction and wear*. – 2007. - No. 47. P. 249-258.

**Melnyk Volodymyr Borysovych** - candidate. technical of Sciences, Associate Professor, 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>.

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

**Mamai Bohdan Mykolayovych** - graduate of higher education with a master's degree in the specialty 152 "Metrology and information and measurement technology", educational and professional program "Quality, standardization and certification" National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, Email: b909mamay@gmail.com.