

## **Вплив умов роботи на температурний режим підшипників з металевими та керамічними кульками**

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Україна*

Наведено результати експериментального дослідження температурного режиму роботи підшипників кочення за різних умов змащування. Проведено порівняльні випробування суцільнометалевих підшипників та аналогічних підшипників з тілами кочення з нітриду кремнію (гібридних підшипників) при змащуванні струменем оливи та оливо-повітряною сумішшю в діапазоні частот обертання ротора від 0 до 35000 хв<sup>-1</sup>. Для експериментів була використана спеціально створена установка, що дозволяє досліджувати температуру підшипників та температуру змащувальної речовини на вході та виході з підшипників. Осьове навантаження на підшипники створювалося за допомогою пружини стискання, яка спиралася на зовнішні кільця підшипників. Це дозволило замикати навантаження усередині системи. У процесі випробувань величина навантаження становила 0 Н, 1000 Н та 2000 Н. Випробування проводилися для двох режимів змащування підшипників: струменем оливи та оливо-повітряною сумішшю. Описано методику вимірювання температури зовнішнього кільця підшипників. Похибка вимірювання температур розглядалася як комплекс інструментальної похибки та похибки методу. Передбачалося, що похибка визначення температур підпорядковується нормальному розподілу. Проведений аналіз показав, що похибка вимірювання температури кільця підшипника склала  $\pm 2,8^{\circ}\text{C}$  із довірчою ймовірністю 95 %. Встановлено, що підшипники з керамічними кульками у всьому дослідженому діапазоні поведуться якісно та кількісно приблизно так само, як і зі сталевими. Рівень температур у гібридних підшипників дещо вищий при змащуванні як струменем масла, так і оливо-повітряною сумішшю. Простежується явний зв'язок між значеннями температури підшипника та моментом опору в підшипнику: підвищення температури спостерігається за тих самих умов, у яких відбувається підвищення моменту опору.

**Ключові слова:** підшипник кочення, керамічні кульки, експериментальні дослідження, температура підшипника, олива, оливо-повітряна суміш.

В опублікованих раніше роботах [1, 2, 3] викладено деякі результати дослідження звичайних металевих та гібридних підшипників кочення. Термін "гібридні підшипники" зазвичай використовується для позначення підшипників, у яких частина деталей виготовляється з нетрадиційних матеріалів. У нашому випадку це були підшипники, у яких замість сталевих використовувалися керамічні кульки такого самого розміру.

У роботі [1] розглянуто загальні питання дослідження та застосування керамічних та гібридних підшипників кочення та перспективи їх використання в авіаційно-космічній техніці.

Вплив відцентрових сил і втрат у підшипниках, пов'язаних із диференціальним прослизанням тіл кочення, розглянуто у роботі [2].

Робота [3] присвячена експериментальному дослідженню величини втрат потужності в досліджуваних підшипниках при різних осьових навантаженнях та умовах змащування в діапазоні окружних швидкостей від 0 до 35000 хв<sup>-1</sup>. Там же дано описи експериментальної установки та методики проведення випробувань. Наведено деякі дані про вимір робочих температур досліджуваних підшипників,

але відсутні конкретні результати вимірювання температур, отриманих у процесі проведення експериментальних досліджень.

У цій роботі наводяться докладні дані про дослідження температурного режиму підшипників: місця розташування термопар в експериментальній установці, їх тип, методика проведення вимірювань та обробки отриманих даних; аналіз отриманих результатів.

### 1. Стенд, експериментальна установка та методика проведення випробувань

Опис експериментального стенду наведено у наших роботах [1, 2, 3]. Тут ми зупинимося лише на особливостях, які пов'язані з вимірюванням теплового режиму роботи досліджуваних підшипників. На рисунку 1 представлено експериментальну установку, за допомогою якої проводилися випробування.

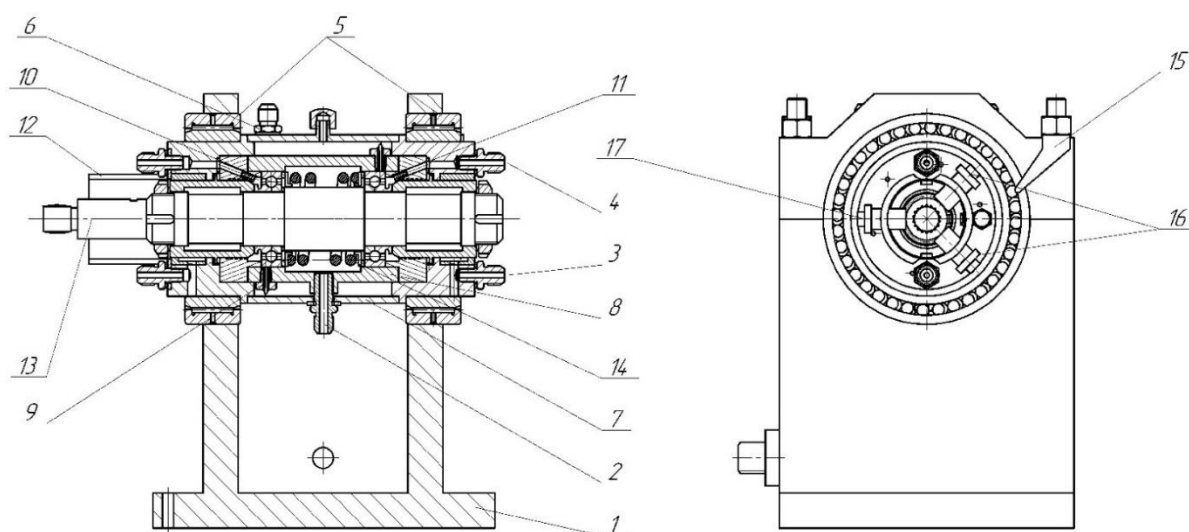


Рис. 1. Блок підшипників, що випробовуються:

- 1 – корпус; 2 – відведення оливи; 3 – підведення повітря для створення радіального зусилля; 4 – місце підведення оливи; 5 – опорні підшипники; 6 – штуцер підведення повітря на підігрів підшипників; 7 – кожух підігріву; 8 – корпус підшипників; 9 – термопара; 10, 11 – підшипники, що випробовуються; 12 – корпус датчиків; 13 – вал; 14 – пружина; 15 – фіксатор; 16 – датчики коливання ротора; 17 – датчик вимірювання частоти обертання

Осьове навантаження на підшипники створювалося за допомогою пружини стискання 14, яка спиралася на зовнішні кільця підшипників 10, 11. Це дозволяє замикати навантаження усередині системи. У процесі випробувань величина навантаження становила 0 Н, 1000 Н та 2 000 Н.

Привод ротора здійснювався електродвигуном постійного струму через зубчастий мультиплікатор, що дозволяло регулювати частоту обертання ротора від 0 до 35 тис. об./хв.

Випробування проводилися для двох режимів змащування підшипників:

- струменем оливи;
- оливо-повітряною сумішшю (ОПС).

При струминному змащуванні олива подавалася від шестеренного насосу в зазор між сепаратором і внутрішнім кільцем підшипника. Діапазон зміни витрати оливи було прийнято наступний: 8,5 г/с; 15 г/с та 25 г/с.

Система подачі ОПС включала повітряний компресор, ємність з оливою, і розпилювач оливи ежекторного типу. При змащуванні ОПС витрата повітря підтримувалася постійною на рівні 0,2 г/с, а вміст оливи в суміші змінювався таким чином: 0,023 г/с (60 крапель/хв); 0,046 г/с (120 крапель/хв); 0,077 г/с (200 крапель/хв).

При випробуваннях використовувалася олива ІПМ-10.

Для реєстрації температури кожного з підшипників, що випробовуються, на його зовнішньому кільці фіксувалися хромель-копелеві термопари 4. Установка термопар на кільці підшипника показана на рисуюнок 2.

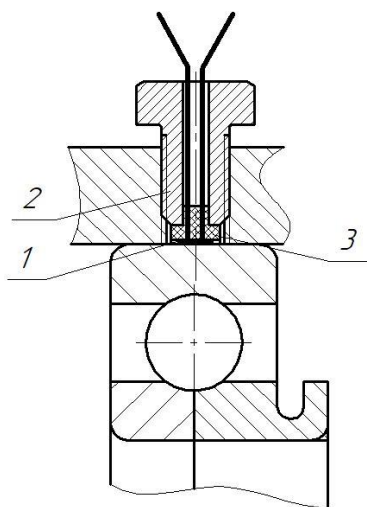


Рис.2. Монтаж термопари:

1 – спай, 2 – штуцер термопари, 3 – притискна втулка для термоізоляції

Реєстрація температури змащувальної речовини здійснювалася хромель-копелевими термопарами, встановленими відповідно на трубопроводах на вході в установку та на штуцері 2 (див. рис. 1) - на виході з неї.

Вимірювання температури проводилося при досягненні стабілізації теплових процесів на кожному режимі випробувань. Сигнали від термодатчиків подавалися на цифровий прилад Ф266, який фіксував температуру, що вимірювалася. Холодний спай термопар розташовувався в термостабільній зоні, температура якої вимірювалася зразковим ртутним термометром.

Похибка вимірювання температур розглядалася як комплекс інструментальної похибки та похибки методу. Передбачалося, що похибка визначення температур підпорядковується нормальному розподілу. Проведений аналіз показав, що похибка вимірювання температури кільця підшипника склала  $\pm 2,8$  °C із довірчою ймовірністю 95 %.

## 2. Аналіз одержаних результатів

На рисунках 3 та 4 представлені значення температур зовнішнього кільця гібридного і суцільнометалевого підшипників при максимальній та мінімальній витратах змащувального середовища та різних значеннях осьового навантаження.

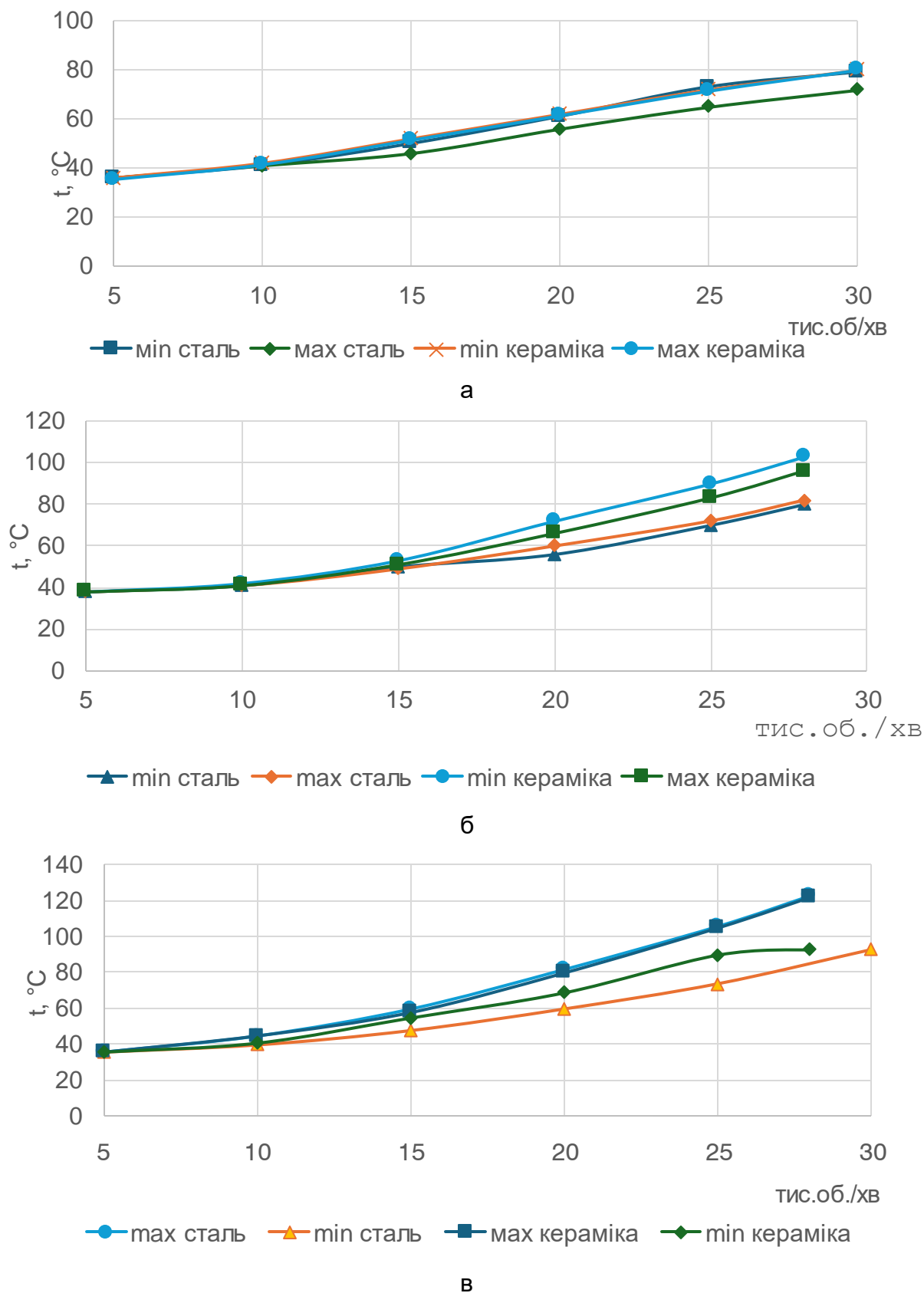
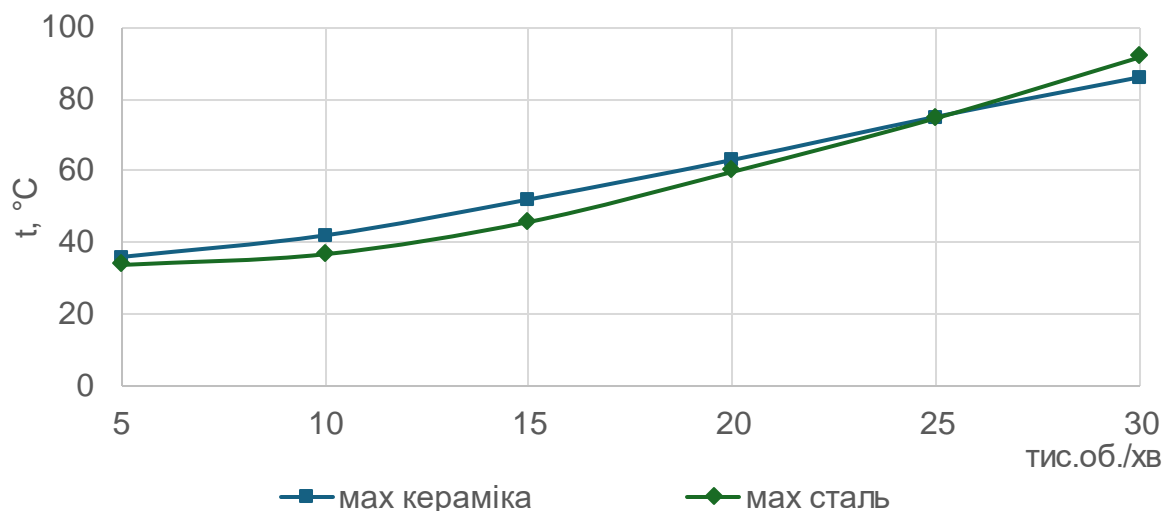
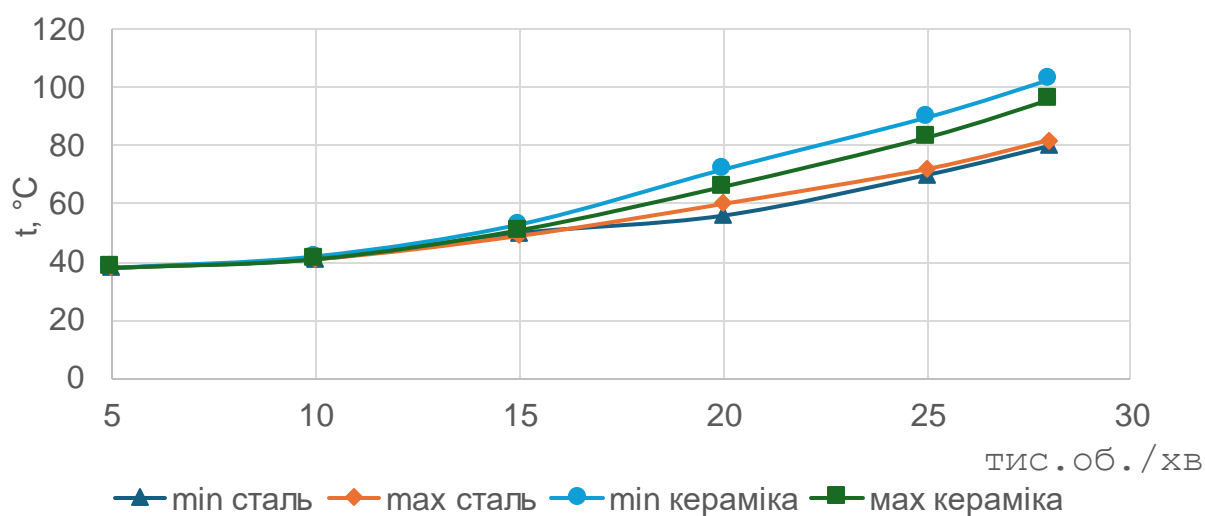


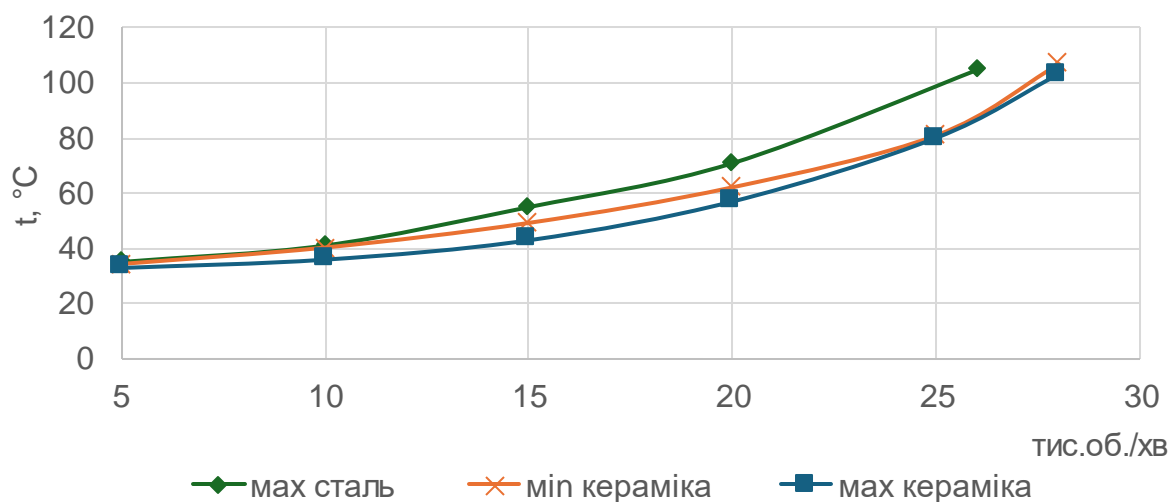
Рис. 3. Результати експериментів при змащуванні оливою та осьовій силі:  
а – 0 Н; б – 1 000 Н; в – 2 000 Н



а



б



в

Рис. 4. Результати експериментів при змащуванні ОПС та осьовій силі:  
а – 0 Н; б – 1 000 Н; в – 2 000 Н

Загалом поведінка гібридних і суцільнометалевих підшипників однакова. При підвищенні частоти обертання, осьового навантаження та витрат оливи температури обох підшипників зростають, що є наслідком зростання втрат потужності на переміщення оливи. Однак рівень температур у гібридних підшипників дещо вищий як при змащуванні струменем оливи, так і ОПС. При мінімальному осьовому навантаженні та при максимальній витраті оливи ця різниця помітніша, ніж при мінімальній витраті оливи і тому ж осьовому навантаженні. Однак при максимальному осьовому навантаженні різниця температур значніша при мінімальній витраті оливи.

Можливо, вищий рівень температур в гібридних підшипниках пов'язаний з різною теплопровідністю керамічних і сталевих тіл кочення. При більш низькій теплопровідності кераміки основний тепловий потік, що утворюється в зоні контакту тіл кочення та доріжки кочення, буде направлений у бік сталевих кілець підшипника, які мають більшу теплопровідність.

При змащуванні струменем оливи та ОПС рівень температур кілець підшипників практично однаковий. Однак варто зазначити, що температура ОПС на вході в підшипник мала менші значення, ніж температура струменя оливи. Ймовірно, це пов'язано з меншою здатністю ОПС до відведення тепла.

Якщо з отриманих значень температури кілець підшипників відняти температуру оливи на вході в підшипник, то при струминному змащуванні температура кілець буде на 15...20 °С нижче за наявності осьового навантаження, і 30...40 °С, якщо осьове навантаження відсутнє.

### **Висновки**

1. В результаті проведення експериментальних досліджень суцільнометалевих і гібридних підшипників встановлено, що температурний режим зазначених підшипників за різних умов роботи відрізняється незначно.

2. При підвищенні обертів та осьового навантаження температури обох типів підшипника зростають. Підвищення витрати оливи також призводить до зростання температури, що є наслідком зростання втрат потужності на переміщення оливи. Діапазон зміни робочих температур кілець підшипника в залежності від зазначених факторів становить від 30 до 130 °С.

3. Рівень температур у гібридних підшипників дещо вищий як при змащуванні струменем оливи, так і ОПС.

4. При змащуванні струменем оливи та ОПС рівень температур кілець підшипників відрізняється незначною мірою. З урахуванням того, що температура оливи на вході в підшипник була вищою, ніж температура ОПС, власне нагрівання підшипника при змащуванні струменем масла буде менше (на 15...40 °С), що пов'язано з меншою здатністю ОПС на відведення тепла.

5. Важливо відзначити, що простежується явний зв'язок між значеннями температури підшипника і моментом опору в підшипнику: підвищення температури спостерігається за тих же умов, за яких відбувається підвищення моменту опору.

### **Список літератури**

1. Доценко, В. Н. Вопросы исследования керамических и гибридных подшипников качения и их применение в авиационных двигателях / В.Н. Доценко,

С.В. Никитин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8 (55). – С. 135 – 144.

2. Доценко, В. Н. Анализ влияния материала тел качения на величину центробежных сил и потери на трение в подшипниках качения со стальными и керамическими шариками / В. Н. Доценко, С. В. Никитин, Е. А. Кононыхин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 136–143.

3. Dotsenko, V. M. Experimental Determination of Power Losses in Steel and Hybrid Rolling Bearings / V. M. Dotsenko, O. M. Gnytko, Yu. V. Koveza, A. V. Kuznetsova. In: Ciobață, D. D. (eds) *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 762. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_13)

### References

1. Docenko, V. N. Voprosy issledovaniya keramicheskikh i gibridnykh podshipnikov kachenija i ih primenenie v aviacionnyh dvigateljah / V.N. Docenko, S.V. Nikitin // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8 (55). – С. 135 – 144.

2. Docenko, V. N. Analiz vlijaniya materiala tel kachenija na velichinu centrobezhnykh sil i poteri na trenie v podshipnikah kachenija so stal'nymi i keramicheskimi sharikami / V. N. Docenko, S. V. Nikitin, E. A. Kononyhin // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 136 – 143.

3. Dotsenko, V. M. Experimental Determination of Power Losses in Steel and Hybrid Rolling Bearings / V. M. Dotsenko, O. M. Gnytko, Yu. V. Koveza, A. V. Kuznetsova. In: Ciobață, D. D. (eds) *International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 762. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_13)

Надійшла в редакцію 22.12.2023, розглянута на редколегії 22.12.2023

### **Influence of working conditions on the temperature regime of the bearings with metal and ceramic balls**

The results of an experimental study of the temperature mode of operation of rolling bearings under different lubrication conditions are presented. Comparative tests of all-metal bearings and similar bearings with rolling elements made of silicon nitride (hybrid bearings) when lubricated with an oil jet and an oil-air mixture in the range of rotor rotation frequencies from 0 to 35000 rpm were carried out. For the experiments, a specially created set was used, which allows you to study the temperature of the bearings and the temperature of the lubricant at the entrance and exit from the bearings. The axial load on the bearings was created with the help of a compression spring, which rested on the outer rings of the bearings. This made it possible to close the load inside the system. During the tests, the load was 0 N, 1000 N, and 2000 N. Tests were carried out for two modes of bearing lubrication: oil jet and oil-air mixture. The method of measuring the temperature of the outer ring of bearings is described. The temperature measurement error was considered as a complex of instrumental error and method error. It was assumed that the temperature error is subject to a normal distribution. The conducted analysis showed that the error of measuring the temperature of the bearing ring was  $\pm 2.8^{\circ}\text{C}$  with a confidence probability of 95 %. It has been established that bearings with ceramic balls in the entire studied range

behave qualitatively and quantitatively in approximately the same way as with steel ones. The temperature level of hybrid bearings is slightly higher when lubricated with both an oil jet and an oil-air mixture. There is a clear connection between the values of the bearing temperature and the moment of resistance in the bearing: the increase in temperature is observed under the same conditions under which the moment of resistance increases.

**Keywords:** rolling bearing, ceramic balls, experimental studies, bearing temperature, oil, oil-air mixture.

### **Відомості про авторів**

**Доценко Володимир Миколаевич** – д-р техн. наук, професор кафедри 202, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [dovl202@ukr.net](mailto:dovl202@ukr.net), тел. 095-945-91-16.

**Ковеза Юрій Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри 202, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: [i.koveza@khai.edu](mailto:i.koveza@khai.edu), 050-325-13-88.

### **About the Authors**

**Dotsenko Volodimir Mikolaevich** – Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department 202, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: [dovl202@ukr.net](mailto:dovl202@ukr.net), tel. +(380)50-945-91-16,  
[ORCID:0000-0002-4785-4578](https://orcid.org/0000-0002-4785-4578)

**Koveza Yuriy Volodimirovich** – Ph.D, Associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic Mechanical Systems, Faculty of Aircraft Engines, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine. E-mail: [i.koveza@khai.edu](mailto:i.koveza@khai.edu), tel. +(380)50-325-13-88.

[ORCID:0000-0003-1131-1405](https://orcid.org/0000-0003-1131-1405)