

УДК 531.4:536.241

## Тепловая диагностика трения в самосмазывающихся подшипниках скольжения с возвратно-вращательным движением вала

Н.П. Старостин, Р.С. Тихонов

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН,  
ул. Автодорожная, д. 20, г. Якутск 677007, Республика Саха (Якутия), Россия

Поступила в редакцию 04.04.2023.

После доработки 29.05.2023.

Принята к публикации 20.06.2023.

Для тепловой диагностики трения — определения временной зависимости фрикционного теплообразования и соответственно момента трения в самосмазывающихся подшипниках скольжения по температурным данным предлагается алгоритм решения обратной задачи теплопроводности методом итерационной регуляризации. Алгоритм итерационной регуляризации для восстановления функции фрикционного теплообразования по температурным данным реализован с использованием трёхмерной модели теплового процесса и учётом скорости возвратно-вращательного движения вала. Принято упрощающее постановку задачи допущение о равномерном распределении удельного теплообразования по длине подшипника. Численное решение модельной задачи проводилось при колебании вала с частотой 1 Гц и амплитудой  $7,5^\circ$ . Шаг по времени выбирался из условия Куранта и составлял 0,1 секунды. При решении обратной задачи во избежание хранения на каждой итерации больших массивов температурных данных полный интервал времени разбивался на локальные. Решения на стыках локальных интервалов склеивались. Предложено условие останова итерационного процесса восстановления функции фрикционного теплообразования, учитывающее суммарную погрешность температурных замеров и вычислений с использованием локальных интервалов. Расчётами показано, что точность восстановления функции удельной интенсивности фрикционного теплообразования по разработанному алгоритму решения обратной задачи равна 9,9% и соизмерима с точностью – 3,8 % задания температурной информации. Разработанный алгоритм определения фрикционного теплообразования с использованием 3D модели теплового процесса может быть использован для определения момента трения по температурным данным в реальных самосмазывающихся подшипниках скольжения, работающих в возвратно-вращательном режиме.

**Ключевые слова:** подшипник скольжения, теплообразование, температура, возвратно-вращательное движение, тепловая диагностика трения, обратная задача, функционал, градиент, регуляризация.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

**Адрес для переписки:**

Р.С. Тихонов  
Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН,  
ул. Автодорожная, д. 20, г. Якутск 677007, Республика Саха  
(Якутия), Россия  
e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

**Address for correspondence:**

R.S. Tikhonov  
Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS,  
Avtodorozhnaya street, 20, Yakutsk 677007, Russia  
e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

**Для цитирования:**

Н.П. Старостин, Р.С. Тихонов  
Тепловая диагностика трения в самосмазывающихся  
подшипниках скольжения с возвратно-вращательным движением  
вала.  
Трение и износ.  
2023. – Т. 44, № 3. – С. 252–260.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

**For citation:**

N.P. Starostin and R.S. Tikhonov.  
[Thermal Diagnostics of Friction in Self-Lubricating Sliding Bearings  
with Swinging Movement of the Shaft].  
*Trenie i Iznos*.  
2023, vol. 44, no. 3, pp. 252–260 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

# Thermal Diagnostics of Friction in Self-Lubricating Sliding Bearings with Swinging Movement of the Shaft

N.P. Starostin and R.S. Tikhonov

*Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS,  
Avtodorozhnaya street, 20, Yakutsk 677007, Russia*

*Received 04.04.2023.*

*Revised 29.05.2023.*

*Accepted 20.06.2023.*

## Abstract

For thermal diagnostics of friction -determining the time dependence of frictional heat generation and, accordingly, the moment of friction in self-lubricating sliding bearings using temperature data, an algorithm for solving the inverse problem of heat conduction by iterative regularization is proposed. The iterative regularization algorithm for restoring the frictional heat generation function from temperature data using a three-dimensional model of the thermal process and taking into account the speed of the swinging movement of the shaft is implemented. An assumption was made about the uniform distribution of specific heat generation along the length of the bearing to simplify the formulation of the problem. The numerical solution of the model problem was carried out with the shaft oscillating with a frequency of 1 Hz and amplitude of 7.5°. The time step was chosen from the Courant condition and was 0.1 seconds. The full time interval was divided into local ones when solving the inverse problem in order to avoid storing large arrays of temperature data at each iteration. The solutions at the junctions of local intervals were glued. A condition for stopping the iterative process of restoring the frictional heat generation function is proposed, taking into account the total error in temperature measurements and calculations using local intervals. Calculations show that the accuracy of restoring the function of the specific intensity of frictional heat generation using the developed algorithm for solving the inverse problem of 9.9 % is commensurate with the accuracy 3.8% of specifying temperature information. The developed algorithm for determining frictional heat generation using a 3D model of the thermal process can be used to determine the friction torque from temperature data in real self-lubricating sliding bearings operating in the oscillation mode.

**Keywords:** sliding bearing, heat generation, temperature, swinging movement, thermal friction diagnostics, inverse problem, functional, gradient, regularization.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

---

### Адрес для переписки:

Р.С. Тихонов  
Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН,  
ул. Автоторожная, д. 20, г. Якутск 677007, Республика Саха  
(Якутия), Россия  
e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

### Address for correspondence:

R.S. Tikhonov  
Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS,  
Avtodorozhnaya street, 20, Yakutsk 677007, Russia  
e-mail: roman\_tikhon@mail.ru

---

### Для цитирования:

Н.П. Старостин, Р.С. Тихонов  
Тепловая диагностика трения в самосмазывающихся  
подшипниках скольжения с возвратно-вращательным движением  
вала.  
Трение и износ.  
2023. – Т. 44, № 3. – С. 252–260.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

### For citation:

N.P. Starostin and R.S. Tikhonov.  
[Thermal Diagnostics of Friction in Self-Lubricating Sliding Bearings  
with Swinging Movement of the Shaft].  
*Trenie i Iznos.*  
2023, vol. 44, no. 3, pp. 252–260 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-3-252-260

## Список использованных источников

1. **Кузнецов В.Д.** Физика резания и трения металлов и кристаллов. Избранные труды. — М.: Наука. — 1977
2. **Костецкий Б.И., Линник Ю.И.** Энергетический баланс при внешнем трении металлов // Доклады Академии наук СССР. — 1968 (183), № 5, 42—46
3. **Протасов Б.В.** Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. — Саратов: СГУ. — 1979
4. **Starostin N.P., Kondakov A.S., and Vasileva M.A.** Identification of Friction Heat Generation in Sliding Bearing by Temperature Data // Inverse Problems in Science and Engineering. — 2013 (21), no. 2, 298—313
5. **Старостин Н.П., Тихонов Р.С.** Моделирование теплового процесса в полимерном подшипнике скольжения с возвратно-вращательным движением вала // Трение и износ. — 2022 (43), № 4, 405—413
6. **Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В.** Экстремальные методы решения некорректных задач. — М.: Наука. — 1988
7. **Кондаков А.С., Старостин Н.П., Васильева М.А.** Тепловая диагностика трения в подшипниках скольжения с учетом пространственного распространения тепла и движения вала // Трение и износ. — 2014 (35), № 1, 62—71
8. **Васильев Ф.П.** Методы оптимизации. — М.: Факториал Пресс. — 2002
9. **Штаерман И.Я.** Контактная задача теории упругости. — М.-Л.: Гостехиздат. — 1940
10. **Алифанов О.М.** Обратные задачи теплообмена. — М.: Машиностроение. — 1988

## References

1. **Kuznetsov V.D.** Fizika rezaniya i treniya metallov i kristallov. Izbrannyye trudy. — M.: Nauka. — 1977 (in Russian)
2. **Kostetskiy B.I., Linnik YU.I.** Energeticheskiy balans pri vneshnem trenii metallov // Doklady Akademii nauk SSSR. — 1968 (183), № 5, 42—46 (in Russian)
3. **Protasov B.V.** Energeticheskiye sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovaniye yego dolgovechnosti. — Saratov: SGU. — 1979 (in Russian)
4. **Starostin N.P., Kondakov A.S., and Vasileva M.A.** Identification of Friction Heat Generation in Sliding Bearing by Temperature Data // Inverse Problems in Science and Engineering. — 2013 (21), no. 2, 298—313
5. **Starostin N.P. and Tikhonov R.S.** Simulation of the Thermal Process in a Polymeric Sliding Bearing with Swinging Movement of the Shaft // Journal Friction and Wear. — 2022 (43), № 4, 405—413
6. **Alifanov O.M., Artyukhin Ye.A., Rumyantsev S.V.** Ekstremal'nyye metody resheniya nekorrektnykh zadach. — M.: Nauka. — 1988 (in Russian)
7. **Kondakov A.S., Starostin N.P., and Vasileva M.A.** Thermal Diagnostics of Friction in Sliding Bearings with Account for Propagation of Heat and Movement of Shaft // Journal of Friction and Wear. — 2014 (35), № 1, 48—54
8. **Vasil'yev F.P.** Metody optimizatsii. — M.: Faktorial Press. — 2002 (in Russian)
9. **Shtayerman I.YA.** Kontaktnaya zadacha teorii uprugosti. — M.-L.: Gostekhizdat. — 1940 (in Russian)
10. **Alifanov O.M.** Obratnyye zadachi teploobmena. — M.: Mashinostroyeniye. — 1988 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.  
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11  
Full text of articles can be purchased from the editorial office.  
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11  
E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)