

## СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

## SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND FLEET RUNNING

Научная статья

УДК 62-93

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-7-12>

### Оценка надежности трибосистем на неустановившихся режимах работы

*Николай Петрович Клименко*

*Керченский государственный морской технологический университет,  
Керчь, Россия, knp-878@mail.ru*

**Аннотация.** Исследуется вопрос определения скорости изнашивания на неустановившихся режимах (в процессе приработки) и на стационарных режимах (после завершения приработки) во время стендовых испытаний элементов судовых технических средств. Наличие такой информации позволит сократить время доводки опытных образцов, а также будет способствовать определению путей повышения надежности технических средств во время эксплуатации. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых с большой достоверностью можно судить о кинетике протекания процессов поверхностного разрушения на этапе приработки трибосистем. Экспериментальные исследования проводились в два этапа и определяли корреляционную связь между скоростью объемного износа и параметрами акустической эмиссии: дисперсией амплитуд сигналов и спектральной мощностью излучения. Представленные графические зависимости подтверждают, что оптимальную функциональную связь с параметрами трения (моментом трения и температурой) имеет спектральная мощность. Анализ полученных зависимостей подтвердил, что дисперсия амплитуд и спектральная мощность сигналов акустической эмиссии достаточно полно и правдоподобно отражают процесс изнашивания и находятся в функциональной взаимосвязи со скоростью объемного износа. Экспериментальным путем на различных трибосистемах установлено, что спектральная мощность сигналов акустической эмиссии имеет лучший коэффициент корреляции со скоростью изнашивания, чем дисперсия, и поэтому может служить параметром для оценки скорости изнашивания на неустановившихся режимах. Предложена методика оценки скорости изнашивания трибосистем во время приработки, которая основана на регистрации акустического излучения из зоны трения. Спектральная мощность акустического излучения коррелирует со скоростью изнашивания с коэффициентом корреляции  $R = 0,8$ .

**Ключевые слова:** надежность трибосистем, неустановившиеся режимы работы, акустическая эмиссия, скорость изнашивания, экспериментальные исследования

**Для цитирования:** Клименко Н. П. Оценка надежности трибосистем на неустановившихся режимах работы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 7–12. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-7-12>.

Original article

### Evaluating reliability of tribosystems based on unsteady operating modes

*Nikolay P. Klimenko*

*Kerch State Maritime Technological University,  
Kerch, Russia, knp-878@mail.ru*

**Abstract.** The issue of determining the wear rate in unsteady operating modes (during running-in period) and in stationary modes (after running-in is completed) during bench tests of vessel technical equipment is considered. The availability of such information will reduce the time for finishing prototypes. Moreover, it will help to identify ways to improve the reliability of technical equipment during operation. There have been carried out the experimental studies that showed the reliability of the kinetics of the surface destruction processes at the stage of tribosystems running-in. Experimental studies were carried out in two stages and determined the correlation between the rate of volumetric wear and acoustic emission parameters: the variance of signal amplitudes and the spectral power of radiation. The presented graphic dependences demonstrate that the spectral power has the optimal functional relationship with the friction parameters: friction torque and temperature. The analysis of the dependences obtained showed that the variance of the amplitudes and the spectral power of the acoustic emission signals reflects sufficiently completely the wear process. Thus, it is in a functional relationship with the rate of volumetric wear. It has been experimentally confirmed on various tribosystems that the spectral power of acoustic emission signals has a better correlation coefficient with the wear rate than variance. Therefore, it can serve as a parameter for estimating the wear rate in unsteady operating modes. A technique for evaluating the tribosystems wear rate during running-in is proposed. The technique is based on the recording of acoustic radiation from the friction zone. The spectral power of acoustic radiation correlates with the wear rate with a correlation coefficient  $R = 0.82$ .

**Keywords:** reliability of tribosystems, unsteady operating modes, acoustic emission, wear rate, experimental studies

**For citation:** Klimenko N. P. Evaluating reliability of tribosystems based on unsteady operating modes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;2:7-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-7-12>.

### Введение

Перед постановкой техники на поточное производство выполняют большой объем стендовых испытаний опытных образцов. В процессе проведения испытаний возникает вопрос об определении скорости изнашивания на неустановившихся режимах (во время приработки) и на стационарных режимах (после завершения приработки). При этом желательно получать значения скорости изнашивания в реальном масштабе времени. Наличие такой информации позволит сократить время доводки опытных образцов и повысит надежность агрегатов во время эксплуатации.

Вследствие анализа информационного содержания параметров акустической эмиссии (АЭ), а также комплексных показателей поверхностного разрушения в работе [1] установлено, что амплитуда АЭ при фрикционном взаимодействии имеет непрерывную последовательность перекрывающихся импульсов.

В работе [2] проиллюстрирован вид сигнала АЭ на установившемся режиме и при возникновении повреждений для обоснования выбора информативных параметров. Как следует из результатов исследования [2], амплитуда акустических сигналов может быть задана как функция действительной переменной  $t$  (времени). Для каждого нестационарного процесса существуют отрезки времени, в пределах которых с известным приближением данный процесс может считаться стационарным и эргодическим.

Таким образом, изменяя интервал интегрирования (задавая достаточно малый интервал) при изменении сигналов АЭ, возможно изучать процессы поверхностного разрушения (интенсивности изна-

шивания и границы выхода на повреждаемость) на этапе приработки трибосистем.

### Методы и объект исследования

Согласно теореме о дисперсии линейной функции некоррелированных случайных величин [3] дисперсия стационарной случайной функции равна сумме дисперсий всех гармоник ее спектрального разложения.

Разобьем частотный диапазон регистрации сигналов АЭ на участки. Обозначим расстояние между участками  $\Delta\omega$ . Измерим дисперсии изменения амплитуд АЭ на каждом участке и построим диаграмму, высота которой на каждом участке  $\Delta\omega$  определяется как

$$S_x(\omega_x) = \frac{D_x}{\Delta\omega}$$

и представляет среднюю плотность дисперсии на этом участке.

Если неограниченно уменьшать интервал  $\Delta\omega \rightarrow 0$ , то ступенчатая диаграмма неограниченно приближается к плавной кривой  $S_x(\omega)$ , которая представляется как совместное амплитудно-временное распределение. Как свидетельствуют проведенные экспериментальные исследования, по этой характеристике можно с большой достоверностью судить о кинетике протекания процессов поверхностного разрушения на этапе приработки трибосистем. Результаты многочисленных проведенных экспериментов по анализу процесса приработки трибосистем доказали [4–6], что при оценке интенсивности изнашивания лучше всего использовать спектральную мощность акустико-эмиссионного излучения, которая определялась по выражению

$$W_A = \frac{A_{\Sigma}^2}{t_p}$$

где  $A_{\Sigma}^2$  – суммарное значение квадрата амплитуд за время регистрации  $t_p$ .

### Результаты исследований

Экспериментальные исследования проводились в два этапа и имели цель – определить корреляционную связь между скоростью объемного износа  $I_V$ , м<sup>3</sup>/с, и параметрами АЭ: дисперсией амплитуд сигналов АЭ  $D_A$ , В, и спектральной мощностью излучения  $W_A$ , В<sup>2</sup>/с.

Первый этап экспериментальных исследований был направлен на определение функциональной связи между перечисленными параметрами во время переходного процесса.

Второй этап был направлен на определение корреляционной связи между перечисленными выше параметрами на установившемся режиме работы трибосистемы, т. е. после завершения переходного процесса (приработки).

Экспериментальные исследования проводились на машине трения по двум кинематическим схемам: «диск – диск» и «кольцо – кольцо», первая из

которых является высшей кинематической парой, а вторая – низшей [7–10].

Акустико-эмиссионное излучение снималось с неподвижного элемента трибосистемы с помощью пьезоэлемента ЦТС-19. После пьезоэлемента сигнал АЭ усиливался предварительным усилителем и передавался на основной усилитель. После основного усилителя сигнал АЭ в виде изменяющейся во времени амплитуды подавался через аналогово-цифровой преобразователь в компьютер для дальнейшего определения дисперсии  $D_A$  и  $W_A$ . Время регистрации  $t_p$  определялось экспериментально по воспроизводимости результатов при равнозначных повторах и составило 5 с.

Результаты экспериментальных исследований представлены в графическом виде на рис. 1, который отражает среднее значение параметров по трем однотипным повторам. Согласно представленным графическим зависимостям наилучшую функциональную связь с параметрами трения (моментом трения  $M_{тр}$  и температурой  $T$ ) имеет спектральная мощность АЭ ( $W_A$ ), т. к. диапазон ее изменения в точке 1 относительно точки 2 значительно больше, чем у дисперсии амплитуд АЭ ( $D_A$ ).

Klimenko N. P. Evaluating reliability of tribosystems based on unsteady operating modes

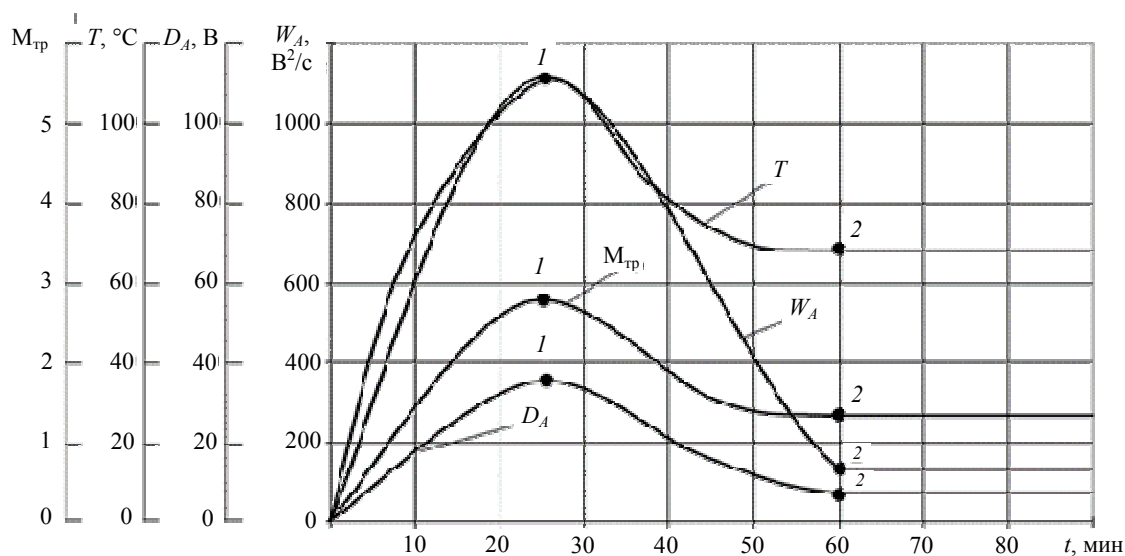


Рис. 1. Измерение параметров переходного процесса во времени

Fig. 1. Measurement of transient parameters in time

Вторым этапом экспериментальных исследований определена функциональная взаимосвязь между скоростью объемного износа  $I_V$  и параметрами АЭ ( $D_A$  и  $W_A$ ) для указанных выше пар трения при изменении нагрузки на узле трения от 300 до 1 200 Н.

Цель исследований – доказать, что по величине параметров АЭ можно оценивать величину скоро-

сти объемного износа  $I_V$ .

Исследования проводились на стационарных режимах трения, т. е. износ за приработку не учитывался. Для этого после завершения приработки (после стабилизации параметров) на поверхности трения наносились лунки для измерения износа и после проведения испытаний в течение двух часов мето-

дом искусственных баз определялся линейный износ, который пересчитывали в объемный.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2.

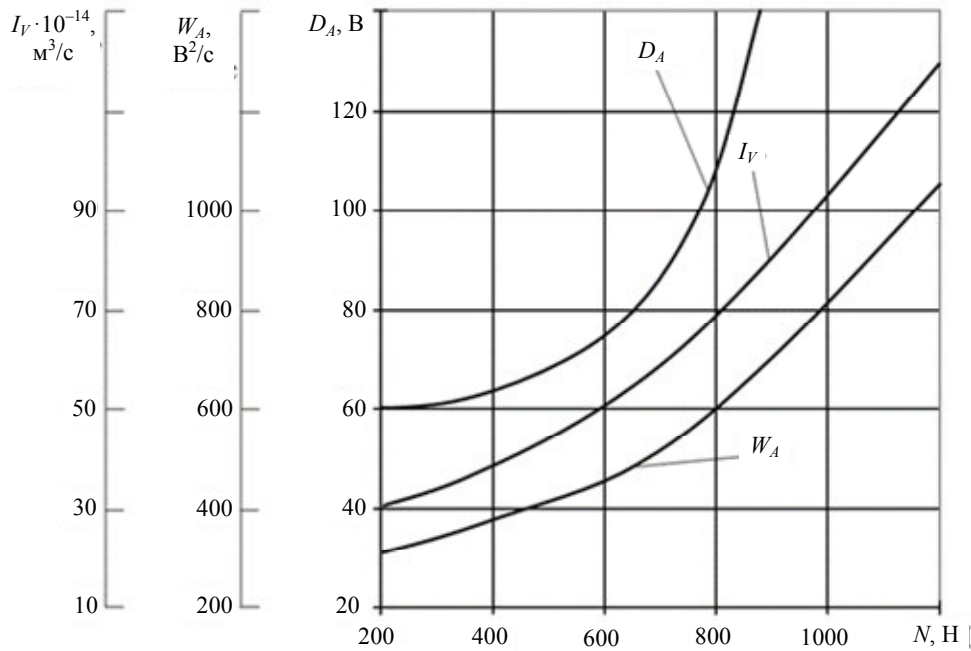


Рис. 2. Зависимость скорости износа  $I_V$ , спектральной мощности акустической эмиссии  $W_A$  и дисперсии акустической эмиссии  $D_A$  от изменения нагрузки в трибосистеме

Fig. 2. Dependence of wear rate  $I_V$ , acoustic emission spectral power  $W_A$ , and acoustic emission dispersion  $D_A$  on load changes in the tribosystem

Анализ представленных зависимостей свидетельствует о том, что дисперсия амплитуд и спектральная мощность сигналов АЭ адекватно отражает процесс изнашивания и находится в функциональной взаимосвязи со скоростью объемного износа. Однако возникает вопрос, какой из представленных параметров сигналов АЭ наиболее отражает корреляционную связь со скоростью объемного износа.

Для ответа на поставленный вопрос по результатам проведенных выше экспериментов были построены следующие зависимости:

$$I_V = f(D_A); \quad (1)$$

$$I_V = f(W_A). \quad (2)$$

Графический вид зависимостей (1) и (2) приведен на рис. 3. Для представленных зависимостей был рассчитан коэффициент корреляции  $R$ , который для зависимости (1) составил  $R = 0,77$ , а для зависимости (2) –  $R = 0,8$ . Из расчета следует, что спектральная мощность сигналов АЭ наиболее адекватно отражает процесс изнашивания, по ее

величине можно судить о величине скорости износа в точках 1 и 2 (см. рис. 1) переходного процесса.

Линейный характер зависимостей скорости износа от параметров АЭ ( $D_A$  и  $W_A$ ) позволяет для расчета интенсивности изнашивания в точках 1 по отношению к точкам 2 (см. рис. 1) использовать следующее соотношение:

$$\frac{I_{V \max}}{I_{V \text{уст}}} = \frac{W_{A \max}}{W_{A \text{уст}}}, \quad (3)$$

где  $I_{V \max}$  и  $W_{A \max}$  – максимальные значения скорости износа и спектральной мощности во время переходного процесса, т. е. в точке 1;  $I_{V \text{уст}}$  и  $W_{A \text{уст}}$  – значения скорости износа и спектральной мощности сигналов АЭ на установившемся режиме, т. е. в точке 2, после завершения переходного процесса.

Следовательно, для нахождения максимального значения скорости износа за время переходного процесса из соотношения (3) следует:

$$I_{V \max} = \frac{W_{A \max}}{W_{A \text{уст}}} I_{V \text{уст}}.$$

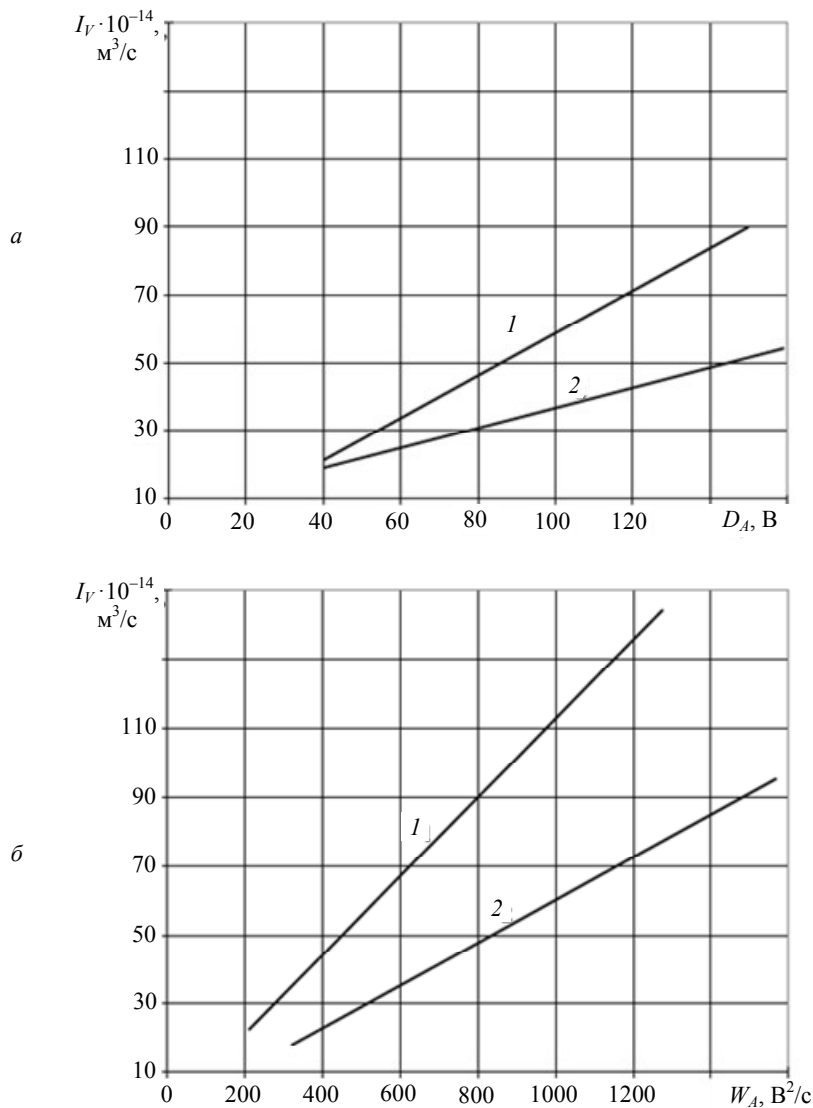


Рис. 3. Зависимость скорости износа  $I_V$ : *a* – от дисперсии амплитуд акустической эмиссии  $D_A$ ; *б* – от спектральной мощности сигналов акустической эмиссии  $W_A$ ; 1 – высшие кинематические пары; 2 – низшие кинематические пары

Fig. 3. Dependence of the wear rate  $I_V$ : *a* - on the dispersion of acoustic emission amplitudes  $D_A$ ; *б* - spectral power of acoustic emission signals  $W_A$ ; 1 - higher kinematic pairs; 2 - lower kinematic pairs

### Заключение

Экспериментальным путем на различных трибосистемах установлено, что спектральная мощность сигналов АЭ имеет лучший коэффициент корреляции со скоростью изнашивания, чем дисперсия, и поэтому может служить параметром для

оценки скорости изнашивания на неустановившихся режимах. Предложена методика оценки скорости изнашивания трибосистем во время приработки, которая основана на регистрации акустического излучения из зоны трения.

### Список источников

1. Свириденко А. И., Мышкин Н. К., Калмыкова Т. Ф. и др. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск: Наука и техника, 1987. 280 с.
2. Войтов В. А., Шевченко С. А. Обоснование структуры комплекса для исследования акустико-эмиссионных

- признаков дефектов подшипников качения // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2011. № 109. С. 50–54.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

4. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трибология. Принципы и приложения. Гомель: ИММС НАНБ, 2002. 310 с.
5. Основы трибологии / под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
6. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / под ред. Д. Г. Громаковского. Самара: Изд-во СГТУ, 2000. 268 с.
7. *Encyclopedia of Tribology* / ed. by Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. Springer, 2013. 4139 p.

8. Frycz M., Miszczak A. The friction force and friction coefficient in the journal sliding bearing ferrofluid lubricated with different concentrations of magnetic particles // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011. V. 18. N. 4. P. 113–120.
9. Лузнов Ю. М., Александров В. Д. Основы триботехники. М.: МАДИ, 2013. 136 с.
10. Гаркунов Д. Н., Мельников Э. Л., Гаврилюк В. С. Триботехника. М.: Кнорус, 2013. 408 с.

#### References

1. Sviridenok A. I., Myshkin N. K., Kalmykova T. F. i dr. *Akusticheskie i elektricheskie metody v tribotekhnike* [Acoustic and electrical methods in tribotechnics]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 280 p.
2. Voitov V. A., Shevchenko S. A. Obosnovanie struktury kompleksa dlia issledovaniia akustiko-emissionnykh priznakov defektov podshpnikov kacheniiia [Substantiation of structure of complex for studying acoustic-emission signs of defects in rolling bearings]. *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu sil's'kogo gospodarstva*, 2011, no. 109, pp. 50-54.
3. Venttsel' E. S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 576 p.
4. Myshkin N. K., Petrokovets M. I. *Tribologiya. Printsipy i prilozheniia* [Tribology. Principles and applications]. Gomel', IMMS NANB, 2002. 310 p.
5. *Osnovy tribologii* [Fundamentals of tribology]. Pod redaktsiei A. V. Chichinadze. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p.
6. *Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mekhanika i tekhnicheskie prilozheniia* [Tribology. Physical foundations, mechanics and technical applications]. Pod redaktsiei D. G. Gromakovskogo. Samara, Izd-vo SGTU, 2000. 268 p.
7. *Encyclopedia of Tribology*. Ed. by Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. Springer, 2013. 4139 p.
8. Frycz M., Miszczak A. The friction force and friction coefficient in the journal sliding bearing ferrofluid lubricated with different concentrations of magnetic particles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 113-120.
9. Luzhnov Iu. M., Aleksandrov V. D. *Osnovy tribotekhniki* [Fundamentals of tribotechnics]. Moscow, MADI Publ., 2013. 136 p.
10. Garkunov D. N., Mel'nikov E. L., Gavriiliuk V. S. *Tribotekhnika* [Tribotechnics]. Moscow, Knorus Publ., 2013. 408 p.

Статья поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена после рецензирования 20.04.2022; принята к публикации 28.04.2022  
The article was submitted 31.03.2022; approved after reviewing 20.04.2022; accepted for publication 28.04.2022

#### Информация об авторе / Information about the author

**Николай Петрович Клименко** — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры судовых энергетических установок; Керченский государственный морской технологический университет; knp-878@mail.ru

**Nikolay P. Klimenko** — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Ship Power Plants; Kerch State Maritime Technological University; knp-878@mail.ru

